



Ε.Γ.Μ.Ε.

Εταιρία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
5ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Συνεδριακό κέντρο ΤΕΙ Λάρισας
18-20 Οκτωβρίου 2007

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

5^ο ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ (ΕΓΜΕ)
Βόλος, 10 Οκτωβρίου 2007.

Επιμέλεια πρακτικών: Νικόλαος Κατσούλας,
Γ. Γραμματέας ΕΓΜΕ
Λέκτορας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
τηλ. 2421093249, e-mail: nkatsoul@uth.gr

Επιμέλεια εξώφυλλου πρακτικών και αφίσας συνεδρίου:
Δρ. Χρήστος Καβαλάρης,
ΙΔΑΧ Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

**ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΑΔΟΣ (ΕΓΜΕ)
HELLENIC SOCIETY OF AGRICULTURAL
ENGINEERS (HelAgEng)**

**ΠΡΑΚΤΙΚΑ
5^ο ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

*«Η συμβολή των Γεωργικών Μηχανικών σε μια
ανταγωνιστική γεωργία»*

Λάρισα, 18-20 Οκτωβρίου 2007

Υπό την Αιγίδα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Συνδιοργάνωση: ΤΕΙ Λάρισας

5^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Οργανωτική Επιτροπή

Πρόεδρος:

Γέμτος Θ. Α., Καθηγητής Π.Θ.

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Σακελλαρίου Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.

Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ

Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ

Φουντάς Σ., Δρ. Π.Θ.

Καβαλάρης Χ., Δρ. Π.Θ.

Καραμούτης Χ., Δρ. Π.Θ.

Λέλλης Θ., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Ντιούδης Π., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Πατέρας Δ., Αν. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Γράβαλος Ι., Επ. Καθηγητής, ΤΕΙ Λάρισας

Γιαλαμάς Θ., Καθ. Εφαρμογών, ΤΕΙ Λάρισας

Τούλιος Λ., Ερευνητής, ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Καλφούντζος Δ., Ερευνητής, ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Επιστημονική Επιτροπή

Πρόεδρος:

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.

Αρβανίτης Κ. Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Ασημακόπουλος Ι., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Βαλιάντζας Ι., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Βάλμης Σ., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Βουγιούκας Στ., Επικ. Καθηγητής ΑΠΘ

Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.

Γεωργακάκης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Γιαννόπουλος Στ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Δημήρκου Ανθ., Αν. Καθηγήτρια Π.Θ.

Ζήσης Θ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Καλφούτζος Δ., ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ

Καραντούνιας Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ.

Κερκίδης Π., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.

Κυρίτσης Σ., Ομ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Λιακατάς Α., Καθηγητής Γ.Π.Α.

Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μισοπολινός Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαρτζάνας Θ., Δρ. Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγάκης Π., Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Πανώρας Α., Ερευνητής Ι.Ε.Β. ΕΘΙΑΓΕ
Παπαδάκης Γ., Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παρισόπουλος Γ., Δ/ντης Ι.ΓΕ.Μ.Κ., ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.
Πατέρας Δ., Αν. Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Συγριμής Ν., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Συλλαίος Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τούλιος Λ., ΙΧΤΕΛ ΕΘΙΑΓΕ
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φουντάς Σ., Δρ. Π.Θ.
Χουλιάρης Ν., Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας

Κατάλογος αξιολογητών των εργασιών

Αλεξανδρίδης Θ.	Μιμίδης Θ.
Αλεξίου Ι.	Μπαμπατζιμόπουλος Χ
Αντωνόπουλος Β.	Μπαρμπαγιάννης Ν.
Αργυροκαστρίτης Ι.	Μπαρτζάνας Θ.
Βουγιούκας Στ.	Μυγδάκος Ε.
Γέμτος Θ.	Μυστριώτης Α.
Γεωργίου Π.	Νάνος Γ.
Γιαννόπουλος Στ.	Παναγόπουλος Α.
Δομενικιώτης Ι.	Πανώρας Α.
Ελμαλόγλου Σ.	Παπαδάκης Γ.
Θεοχάρης Μ.	Παπαμιχαήλ Δ.
Καλφούντζος Δ.	Πατέρας Δ.
Καραθάνος Β.	Παυλάτου-Βε Α.
Καραμούζης Δ.	Προδρόμου Κ.
Καρυδάς Χ.	Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ.
Κατσούλας Ν.	Σταυρινός Ε.
Κερκίδης Π.	Συλλαίος Ν.
Κιοσέ-Καμπασακάλη Ε.	Τούλιος Λ.
Κίττας Κ.	Τσατσαρέλης Κ.
Κόκκορας Ι.	Τσιούρης Σ
Κωτσόπουλος Σπ.	Φουντάς Σπ.
Λουκάς Α.	Χαλκίδης Η.
Μαρτζοπούλου Χρ.	Ψιλοβίκος Α.
Ματσή Θεοδώρα	

5^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Χορηγοί του συνεδρίου

- Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων
- Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.
- Κ/Ε ΒΕΡΜΙΟΝ ΑΤΕΕ – ΧΑΥΔΑΣ - ΩΡΟΛΟΓΟΠΟΥΛΟΣ ΑΤΕ,
Ρουπακιάς Ι.
- SCIENTACT Α.Ε.
- ΚΑΜΕΛΙΔΗΣ Α.Τ.Ε.
- ΚΑΡΑΤΖΟΥΝΗΣ ΑΤΕΒΕ
- ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.
- AGROMA, Σ. Πέtkος & ΣΙΑ Ο.Ε.
- Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας (Κ.Ε.ΤΕ.Α.Θ.)
- TERRA Α.Ε.
- Ι. Εσκιάδης και ΣΙΑ Α.Ε.Β.Ε.
- Ένωση Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων Ελλάδος
(Ε.ΚΑ.ΓΕ.Μ.)
- Δαλακούρας Γ., Πολιτικός Μηχανικός
- Κούτη Ευτυχία – Κηποτεχνικά.



Πρόλογος

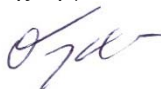
Το 5^ο Εθνικό Συνέδριο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ) οργανώνεται στο ΤΕΙ Λάρισας με συνδιοργανωτές το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και το ΤΕΙ Λάρισας. Πολλές συζητήσεις έγιναν για την αναγκαιότητα του συνεδρίου καθώς στους επόμενους οκτώ μήνες θα διεξαχθεί το Ευρωπαϊκό συνέδριο της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών (Ιούνιος 2008 στην Κρήτη), την οργάνωση του οποίου έχει αναλάβει η ΕΓΜΕ. Επικράτησε όμως η άποψη ότι το Εθνικό συνέδριο έχει διαφορετικούς και αυτοτελείς σκοπούς, όπως τη γνωριμία των νέων Ελλήνων ερευνητών που θα τους δοθεί ένα φιλικό βήμα να παρουσιάσουν τις εργασίες, τη γνωριμία των ερευνητικών ομάδων και του έργου τους, στοιχεία ιδιαίτερα σημαντικά για των επίτευξη των στόχων της Εταιρείας.

Το φετινό συνέδριο πραγματοποιείται μετά από μια ιδιαίτερα ξηρή χρονιά και ένα ιδιαίτερα θερμό καλοκαίρι που προκάλεσε σημαντικές ζημιές στις γεωργικές καλλιέργειες αλλά και στα δασικά οικοσυστήματα πολλών περιοχών της χώρας. Οι κλιματικές αλλαγές κάνουν έντονη την παρουσία τους και στη χώρα μας. Η εταιρεία μας έχει να παίξει σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια της άμβλυνσης των αρνητικών τους επιπτώσεων. Η διαχείριση των υδάτινων και εδαφικών πόρων αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και πολλές από τις εργασίες του συνεδρίου δίνουν νέες ιδέες και λύσεις. Η εκμηχάνιση της γεωργίας συμβάλλει στη διατήρηση μιας οικονομικά βιώσιμης γεωργίας στη χώρα μας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, που τόσο ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και αυξάνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σημαντική συμβολή στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της γεωργίας της χώρας, στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον και στην καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων προσφέρουν οι εφαρμογές των νέων τεχνολογιών στη γεωργία, η τεχνολογία των καλλιεργειών υπό κάλυψη και η συντήρηση και μεταποίηση των προϊόντων. Θεωρούμε ότι το 5^ο Συνέδριο θα συμβάλλει ουσιαστικά στην προώθηση κατάλληλων λύσεων στα παραπάνω θέματα.

Στο συνέδριο υπεβλήθησαν 137 περιλήψεις και τελικά έγιναν δεκτές 110 πλήρεις εργασίες που θα παρουσιαστούν προφορικά στις τρεις παράλληλες συνεδριάσεις του συνεδρίου. Πιστεύω ότι το συνέδριο θα ακολουθήσει την επιτυχία των προηγούμενων.

Με την ευκαιρία αυτή θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους αξιολογητές των εργασιών που υπεβλήθησαν και στους συντελεστές της οργάνωσης αυτού του συνεδρίου. Ο Λέκτορας του Π.Θ. κ. Ν. Κατσούλας και ο Δρ. κ. Σπ. Φουντάς διακαίονται τις περισσότερες, καθώς χάρη στην εργασία τους έγινε δυνατή η καλή οργάνωση του συνεδρίου. Ο Αν. Καθηγητής κ. Θ. Λέλλης και η ομάδα του ΤΕΙ Λάρισας είχαν σημαντική συμβολή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους χορηγούς του συνεδρίου.

Ν. Ιωνία, 10 Οκτωβρίου 2007
Ο πρόεδρος της Οργανωτικής Επιτροπής



Καθηγητής Θ.Α. Γέμτος

Περιεχόμενα

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ – ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΙ	19
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΡΙΕΤΟΥΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΝΕΟΤΕΡΑ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	21
Μυγδάκος Ε., Πατσιαλή Σ., Αυγουλάς Χ., Μυγδάκος Γ. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΜΙΑΣ ΒΑΜΒΑΚΟΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	31
Ε. Γρ. Μυγδάκος ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	44
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Α. Αυγουστής, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος	44
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΕ ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	52
Ε. Λάμπου, Κ. Ζάννης και Ε. Καραγιάννης ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΙΣΟΠΕΔΩΣΗΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	58
Κ. Ζάννης, Δ. Μπόχτης, Ε. Λάμπου και Αθ. Καραγιάννης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗΣ ΕΛΞΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΟΜΟΙΩΜΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ	65
Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Α. Ανδρέου, Σ. Τσάντζος, Δ. Κατέρης, Κ.Α. Τσατσαρέλης, Θ. Α. Γέμτος ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	73
Θ. Α. Γιαλαμάς, Ε. Παπαχρήστου, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Χ. Δημητριάδης, Κ.Α. Τσατσαρέλης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ	80
Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Κ.Α.Τσατσαρέλης, Θ.Α. Γέμτος ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΕΥΣΤΑΘΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	87
Θ.Α. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης, Κ.Α. Τσατσαρέλης ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΟΥΣ ΤΗΣ ΛΕΒΑΝΤΑΣ.....	95
Χ. Ι. Δημητριάδης, J. L. Brighton, Ι. Κόκκορας, Ι. Γράβαλος, Θ.Α. Γιαλαμάς ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΟΠΗΣ ΠΕΡΙΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΟΡΤΟΥ	103
Χ.Κ. Κοτσακιώτη, Δ.Δ. Μπόχτης, Ι.Α. Σπανομήτρος, Ι.Γ. Αμπατζίδης και Κ.Α. Τσατσαρέλης ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΥΡΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ..	111
Α.Γ. Ντιρογιάννης, Ι.Γ. Αμπατζίδης, Δ.Δ. Μπόχτης, Ι.Α. Σπανομήτρος και Κ.Α. Τσατσαρέλης ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΚΡΑΔΑΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΑΦΙ.....	119
Θ.Α. Γέμτος, Σπ. Φουντάς, Χρ. Παπανικολάου, Ν. Νάνμος, Β. Βλάχος ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ, ΤΑ ΦΥΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	127
Καβαλάρης Χρ., Καραμούτης Χρ., Κ. Αγγελοπούλου, Θ.Α. Γέμτος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΕΝΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΙΣΧΥΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΕΙΣΔΥΣΙΟΜΕΤΡΟΥ.....	135

Χ. Καραμούτης, Χ. Καβαλάρης, Δ. Παράφορος, Ο. Παπαδοπούλου, Κ. Κολιπέτσας και Θ.Α. Γέμτος	
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΝΕΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΣΠΟΡΑΣ	143
Α. Π. Δεδούσης, R. J. Godwin	
Η ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.....	152
Α. Νάτσης, Θ. Γέμτος, Ε. Μυγδάκος, Η. Νάτσης	
ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ	163
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΗΤΑ PROBE ML2 ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	165
Γ. Κάργας, Α. Σγουμποπούλου, Β. Φασούλη και Π. Κερκίδης	
ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ.....	173
Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Χ. Παπανικολάου και Σ. Πατελοδήμου	
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ.....	181
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Κ. Α. Δημοπούλου, Θ. Βούλγαρης	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΝΕΡΟΥ ΛΟΓΩ ΒΑΘΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ	189
Ε. Διαμαντόπουλος, Σ. Ελμαλόγλου	
ΑΠΛΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....	196
Α. Λουκάς	
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ – ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ	205
Π.Ε. Γεωργίου και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ.....	213
Π. Βύρλας και Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΑΓΡΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ ΕΝΣΙΡΩΣΗΣ.....	221
Β. Αντωνόπουλος, Ε. Λεκάκης και Α. Παυλάτου-Βε	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΟΡΥΖΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ GLEAMS	229
Β.Ζ. Αντωνόπουλος, Β.Γ. Ασχονίτης, Μ.Η. Rahil, Ε.Η. Λεκάκης	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	237
Β. Αντωνόπουλος, Β. Λίτσкас, Β. Ασχονίτης και Σ. Τσιούρης	
ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	245
Μ. Θεοχάρης	
ΜΟΝΙΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	253
Μ. Θεοχάρης	
ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΑΝΑΠΛΗΡΩΣΗ ΦΡΕΑΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΦΡΕΑΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	262
Δ.Ν. Καραμούζης και Π.Ε. Γεωργίου	

ΣΧΕΔΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Ν. ΚΑΛΥΜΝΟΥ	270
Δ. Κ. Καρπούζος	
Η ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ	
ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60/ΕΕ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΟΙΝΗΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ	280
Ε. Σταυρινός	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ, ΣΤΡΕΣ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΜΕΝΗΣ ΜΕ GIS ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ	288
Αγ. Φιλίντας, Π. Ντιούδης, Θ. Λέλλης, Αρ. Παπαδόπουλος και Ι. Χατζόπουλος	
ΝΕΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ	
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	296
Β. Άμπας, Ε. Μπαλτάς και Δ. Παπαμιχαήλ	
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ	
ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ	304
Δ. Καλφούντζος, Ι. Αλεξίου, Σ. Κωτσόπουλος	
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΧΕΙΜΑΡΡΟ	
ΛΥΚΟΡΡΕΜΑ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΠΕΝΤΕΛΗΣ	312
Κ. Σούλης, Ν. Δέρκας, Ι. Δ. Βαλιάντζας	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΟΥ Τ.Ο.Ε.Β. ΠΗΝΕΙΟΥ ΣΤΗΝ	
ΚΑΛΥΨΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ	320
Σ. Κωτσόπουλος, Ι. Αλεξίου, Φ. Λόκκας, Γ. Γραβάνης και Σ. Μαγαλιός	
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ	
ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2000/60	328
Ν. Δέρκας, Π. Λόντρα και Α. Καραμάνος	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WAVE	337
Ι. Αλεξίου, Δ. Παπαμιχαήλ και Β. Αντωνόπουλος	
PLEIADES –ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ	
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	345
Α. Μπλάντα, Χ. Δομενικιώτης και Ν. Δαλέζιος	
ΑΔΡΟΜΕΡΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ	
ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ RDI	353
Γ. Τσακίρης, Δ. Τίγκας	
ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	362
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ...	364
Ι. Κυρίκου, Δ. Μπριασούλης και Μ. Χισκάκης	
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ..	372
Γ. Ντίνας, Π. Κούγιας, Χ. Νικήτα- Μαρτζοπούλου	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ CO ₂	
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	380
Δ. Βαφειάδης, Μ. Μπότας, Χ. Παπαμάνθος και Χ. Νικήτα- Μαρτζοπούλου	
Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	
ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	387
Ι. Λυκοσκούφης, Γ. Μαυρογιαννόπουλος	
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΥΡΩ ΑΠΟ	
ΥΠΕΡΥΨΩΜΕΝΟ ΠΕΡΑΤΟ ΠΕΤΑΣΜΑ	395
Α. Γιαννούλης, Α. Μυστριώτης και Δ. Μπριασούλης	

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ	403
I. Λ. Τσιρογιάννης, Ν. Κατσούλας, Κ. Κίττας και Δ. Σάββας	
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	411
Βέντζας Δ., Παναγιωτίδη Αικ.	
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	421
Κ. Μπαξεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας, Δ. Φειδαρος, Κ. Κίττας	
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	429
N. Tadj, Θ. Μπαρτζάνας, B .Draoui και Κ. Κίττας	
ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	437
Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας	
ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ	445
Κ. Κίττας, Γ. Δημόκας και Μ. Tchamitchian	
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ.....	453
Γ. Δημόκας, Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας και Ν. Δημόκας	
ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΓΙΑ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΣΠΟΡΟΦΥΤΩΝ.....	462
N. Κατσούλας, Κ. Πεπονάκης, Δ. Πετσάνη, Κ. Κίττας	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΓΟΝΙΚΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΓΓΟΥΡΙΟΥ	469
Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Χ. Μανωλαράκη, Θ. Μπαρτζάνας	
ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΕΛΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ.....	478
ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΒΟΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΑ ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ	480
Κ. Π. Προδρόμου και Χ. Λάκης	
ΟΔΗΓΙΕΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΓΡΟΤΕΜΑΧΙΟ ΜΕΣΩ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΗΜΩΝ Ν. ΚΟΖΑΝΗΣ.....	487
Φ. Παπαδόπουλος, Α. Παπαδόπουλος και Π. Τζιαχρή	
ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ Cd ΚΑΙ Cr ΣΕ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΕΔΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ	495
Ε. Ε. Γκόλια , Α. Δημήρκου, Στ. Α. Φλωράς, Κ. Παπαδήμας, Γ. Σκαμαγκούλης και Ι. Κ. Μήτσιος†	
ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΜΑΚΡΟ- ΚΑΙ ΜΙΚΡΟ-ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΕΔΑΦΗ ΚΑΙ ΝΕΡΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΜΥΡΟΥ, ΝΟΜΟΥ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ.	503
Α. Δημήρκου, Ε. Ε. Γκόλια , Στ. Α. Φλωράς, Χ. Ηλιόπουλος, Γ. Σκαμαγκούλης και Ι. Κ. Μήτσιος†	
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΟΥΜΕΝΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΡΙΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ ΣΤΙΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ.....	511
N. Χουλιάρης, Φ. Γραβάνης, Η. Αναστασόπουλος, Ι. Βασιλάκογλου, Ν. Γκουγκουλιάς, Ι. Βαγγέλας, Α. Τσιτσιγιάννης και Ε. Βογιατζή	

Η ΕΠΟΧΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ (BioP), ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΜΕ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ - ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ	519
Σιήμης Α. και Παυλάτου –Βε Α. Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΟΡΥΖΩΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ	527
Αλαμάνου Μ., Παυλάτου-Βε Α., Ασκονίτης Β., Λίτσας Β. και Αντωνόπουλος Β. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΠΡΟΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ALFISOL ΚΑΙ VERTISOL	535
Κ. Π. Παναγιωτόπουλος και Γ. Τσολάκη	
ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ	542
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΜΕΣΩ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	544
Α. Άνθης, Ι. Βαφειάδης ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ Χ. Ζαραγκότας, Α. Λουκάς, Λ. Βασιλειάδης και Π. Μήτσιου ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΔΡΙΜΥΤΗΤΑ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	558
Γ.Τζαμπύρας, Α.Λουκάς και Λ.Βασιλειάδης	
ΕΝΟΤΗΤΑ 6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	566
ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΞΥΛΟΥ ΜΕ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	568
Α. Καραγιάννης, Ε. Λάμπου και Π. Καραρίζος ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΑΙΣΘΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΠΡΕΣΠΩΝ	575
Γ. Σαπουντζάκης, Μ. Γιαμούρη , Α. Παπαγιαννοπούλου, Φ. Παπαδόπουλος και Γ. Παρισόπουλος ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΑΓΡΟ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΟ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΛΥΜΑΤΑ	583
Β. Ζ. Αντωνόπουλος και Μ. Η. Rahil ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	592
Γ. Τζιαφάς, Χ. Τοπάλογλου, Ο. Χρίστου και Ν. Συλλαίος ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	600
Ι. Πούλιος, Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΩΝ - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ Ε.Ε.	607
Α. Παπαγιαννοπούλου, Γ. Παρισόπουλος, Χ. Σακκάς ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΟΠΗΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΧΛΩΡΙΩΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ	615
Δ. Φειδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Α. Ζαγορίτης, Π.-Ε. Μπίσκα	
ΕΝΟΤΗΤΑ 7: ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ / ΜΕΤΑΣΥΓΚΟΜΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	626

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΨΥΧΡΟΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΛΩΝ <i>PILAFI DELICIOUS</i> ΚΑΙ <i>GRANNY SMITH</i>	628
Θ. Θεοδωρίδης, Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός και Ε. Αραβαντινός-Καρλάτος ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ» ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ	634
Ε. Μανωλοπούλου, Ν. Καπετάνιος, Ν. Χαλασοχώρη, Γρ. Λαμπρινός ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ».....	642
Ε. Μανωλοπούλου, Θ. Σαμαράς, Ν. Χαλασοχώρη, Γρ. Λαμπρινός Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΛΩΝ ΠΟΙΚΙΛΙΑΣ <i>GRANNY SMITH</i> ΩΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	651
Δ. Μητρόπουλος και Γ. Λαμπρινός ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΗΛΩΝ <i>DELICIOUS</i> <i>PILAFI</i> ΣΕ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ	658
Δ. Μητρόπουλος και Γ. Λαμπρινός ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΨΥΞΗ ΑΣΥΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΟΠΩΡΟΛΑΧΑΝΙΚΩΝ	666
Γ. Ξανθόπουλος, Γρ. Λαμπρινός, Δ. Μητρόπουλος, Ε. Χατζής ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΗΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	675
Ν. Πεντάρης, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος, Δ. Μητρόπουλος και Γρ. Λαμπρινός ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΟΥΜΕΝΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	682
Ε. Χατζής, Σ. Ψυχोगιού, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός	

ΕΝΟΤΗΤΑ 8: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ690

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	692
Εσσάμι Μωχάμεντ, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσσιώτης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ-ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ.....	699
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Α. Αυγουστής, Γ. Λιανός, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Λέλλης ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΛΑΔΟΔΕΜΑΤΩΝ ΕΛΙΑΣ	707
Π. Ξένος-Κοκολέτσης, Ε. Χατζής και Γρ. Λαμπρινός ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ.....	716
Τσιάνος Ν., Θ. Γέμτος, Χ. Καβαλάρης και Χ. Καραμούτης ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ (<i>Brassica sp.</i>) ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ	723
Ι. Ραμνιώτης, Θ. Κωτσόπουλος, Γ. Μαρτζόπουλος ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ ΣΤΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.....	731
Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Ι. Παναγιώτου και Π. Βύρλας ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΠΟΡΟΥ, ΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΠΙΤΑΣ ΔΥΟ ΥΒΡΙΔΙΩΝ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ	738
Π. Α. Καλαβριώτου και Θ. Α. Γέμτος	

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΙΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	746
X. Καβαλάρης, X. Καραμούτης, Π. Καλαβρυώτου και Θ.Α. Γέμτος	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΗΛΙΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	754
Α. Μπαλαφούτης, Δ. Μελάς, Α. Νάτσης, Α. Παπαγιαννοπούλου και Γ. Παπαδάκης	
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΛΥΜΑΤΑ ΧΟΙΡΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ CSTR ΣΤΗ ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΦΙΛΗ ΖΩΝΗ.....	762
Ι. Φωτίδης, Ν. Τσολάκης, Θ. Κωτσόπουλος και Γ. Γ. Μαρτζόπουλος	

ΕΝΟΤΗΤΑ 9: ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.769

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΕΚΝΕΦΩΣΗΣ ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΕ ΦΘΟΡΙΣΜΟ	771
Μ. Βλαχογιάννης, Β. Ιακωβάκης, Θ. Τσιρίκογλου και Δ. Χάχαλης	
ΑΜΑΔΑ: ΜΙΑ ΠΟΛΥΧΡΗΣΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΑΓΡΩΝ.....	779
Ι. Γράβαλος, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Γιαλαμάς, Ζ. Κουτσοφίτης, Π. Ξυραδάκης, Δ. Κατέρης, Ε. Ντάφας, Θ. Λέλλης	
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΜΟΚΟΒΟΥ	787
Α. Αυγουστής, Μ. Σαπουντζής, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης	
ΙΧΝΗΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΝΤΟΣ ΑΓΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΟΠΩΡΟΦΟΡΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ RFID	795
Ι.Γ. Αμπατζίδης, Σ.Γ. Βουγιούκας και Δ.Δ. Μπόχτης	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΠΙΤΟΠΙΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ ΤΗΣ ΕΝΙΑΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΗΝΟ	803
Νικόλαος Μαλάμος, Γεώργιος Παγανέλης	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SLURP ΚΑΙ GIS ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΑΛΜΩΠΑΙΟΥ	812
Π.Ε. Γεωργίου, Γ. Γεωργούλιας, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Μ.Ι. Διαμαντοπούλου	
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	821
Δ.Δ. Μπόχτης, Σ.Γ. Βουγιούκας, Ι.Γ. Αμπατζίδης και Κ.Α. Τσατσαρέλης	
ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΑΣΕΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	829
Σ. Γ. Βουγιούκας	
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	835
Κατσαλής Κ., Ξενάκης Α., Σακαλλερίου Α., Κίικας Π.	
ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ.....	843
Ι.Γ. Αμπατζίδης, Γ.Σ. Τζελέπης και Σ.Γ. Βουγιούκας	
ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΕΛΛΗΝΩΝ ΑΓΡΟΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	850
Σ. ΜΟΥΡΤΖΙΝΗΣ, Σ. ΦΟΥΝΤΑΣ, Θ. ΓΕΜΤΟΣ	
ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΠΩΡΩΝΕΣ ΜΗΛΙΑΣ.....	858
Α. Δ. Αγγελόπουλου, Σ. Blackmore, Σ. Φουντάς, Θ. Α. Γέμτος και Γ. Δ. Νάνος	

ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΧΑΡΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	866
Α. Τάνος, Α. Αγγελουπούλου, Σ. Φουντάς, Θ.Α. Γέμτος, Γ.Δ. Νάνος και Α. Χατζηνίκος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΗΣ ΧΟΡΤΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ.....	874
Δ. Μπόχτης, H.W. Griepentrog, Σ. Βουγιούκας, N.A. Andersen ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ SPOT 5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΓΡΟΤΕΜΑΧΙΩΝ	882
Λ. Τούλιος, Δ. Δουδουμοπούλου, Μ. Τούλιος, και Δ. Χατζημιτσής ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΕ ΚΕΛΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ.....	890
Αικατερίνη Α. Μπαξεβάνου, Δημήτριος Κ. Φείδαρος ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ.....	898
Τρέσσος Κ.Δ., Ανδρέου Ι.Α., Blackmore S. , Φουντάς Σ., Γέμτος Θ.Α.	

Κατάλογος Συγγραφέων

Αγγελοπούλου	A.	Δημοπούλου	K.
Αλαμάνου	M.	Διαμαντόπουλος	E.
Αλεξίου	Δ.	Διαμαντοπούλου	M.I.
Αλεξίου	I.	Δομενικιώτης	X.
Άμπας	B.	Δουδουμοπούλου	Δ.
Αμπατζίδης	I.Γ.	Ελμαλόγλου	Σ.
Αναστασόπουλος	H.	Εσσάμ	M.
Ανδρέου	A.	Ζαγορίτης	A.
Άνθης	A.	Ζάννης	K.
Αντωνόπουλος	B.	Ζαραγκότας	X.
Αραβαντινός-Καρλάτος	E.	Ηλιόπουλος	X.
Αραμπατζής	Γ.	Θεοδωρίδη	Θ.
Ασχονίτης	B.	Θεοχάρης	M.
Αυγουλάς	X.	Ιακωβάκης	B.
Αυγουστής	A.	Καβαλάρης	X.
Βαγγέλας	I.	Καλαβρυώτου	Π.
Βαλιάντζας	I.	Καλφούντζος	Δ.
Βασιλάκογλου	I.	Καπετάνιος	N.
Βασιλειάδης	Λ.	Καραγιάννης	A.
Βαφειάδης	Δ.	Καραγιάννης	E.
Βαφειάδης	I.	Καραμάνος	A.
Βέντζας	Δ.	Καραμούζης	Δ.N.
Βλαχογιάννης	M.	Καραμούτης	X.
Βλάχος	B.	Καραρίζος	Π.
Βογιατζή	E.	Κάργας	Γ.
Βουγιούκας	Σ.	Καρπούζος	Δ.
Βούλγαρης	Θ.	Κατέρης	Δ.
Βύρλας	Π.	Κατσαλής	K.
Γέμτος	Θ.	Κατσούλας	N.
Γεωργίου	Π.E.	Κερκίδης	Π.
Γεωργούλιας	Γ.	Κίκιρας	Π.
Γεωργούσης	X.	Κίττας	K.
Γιαλαμάς	Θ.	Κόκορας	I.
Γιαμούρη	M.	Κολιπέτσας	K.
Γιαννούλης	A.	Κοτσακιώτη	X.K.
Γκόλια	E.	Κούγιας	Π.
Γκουγκουλιάς	N.	Κουτσερής	E.
Γράβαλος	I.	Κουτσοφίτης	Z.
Γραβάνης	Γ.	Κυρίκου	I.
Γραβάνης	Φ.	Κωτσόπουλος	Θ.
Δαλέζιος	N.	Κωτσόπουλος	Σ.
Δεδούσης	A.	Λάκης	X.
Δέρκας	N.	Λάμπου	E.
Δημήρκου	A.	Λαμπρινός	Γ.
Δημητριάδης	X.	Λεκάκης	E.H.
Δημόκας	Γ.	Λέλλης	Θ.
Δημόκας	N.	Λιανός	Γ.

Λίτσκας	Β.	Παναγιωτίδη	Α.
Λόκκας	Φ.	Παναγιωτόπουλος	Κ.Π.
Λόντρα	Π.	Παναγιώτου	Ι.
Λουκάς	Α.	Πανώρας	Α.
Λυκοσκούφης	Ι.	Παπαγιαννοπούλου	Α.
Μαγαλιός	Σ.	Παπαδάκης	Γ.
Μαθιουλάκης	Ε.	Παπαδήμας	Κ.
Μαλάμος	Ν.	Παπαδόπουλος	Α.
Μανωλαράκη	Χ.	Παπαδόπουλος	Φ.
Μανωλοπούλου	Ε.	Παπαδοπούλου	Ο.
Μαρτζόπουλος	Γ.	Παπαμάνθος	Χ.
Μαυρογιαννόπουλος	Γ.	Παπαμιχαήλ	Δ.
Μελάς	Δ.	Παπανικολάου	Χ.
Μητρόπουλος	Δ.	Παπαχρήστου	Ε.
Μήτσιος	Ι.Κ.	Παράφορος	Δ.
Μήτσιου	Π.	Παρισόπουλος	Γ.
Μουρτζίνης	Σ.	Πατελοδήμου	Σ.
Μουσουλιώτης	Α.	Πατσιαλή	Σ.
Μπαλαφουτης	Α.	Πατσιαλής	Κ.
Μπαλτάς	Ε.	Παυλάτου Βε	Α.
Μπαμπατζιμόπουλος	Χ.	Πεντάρης	Ν.
Μπαξεβάνου	Α.	Πεπονάκης	Κ.
Μπαρτζάνας	Θ.	Πετσάνη	Δ.
Μπελεσιώτης	Β.	Πούλιος	Ι.
Μπιλάλης	Δ.	Προδρόμου	Κ.Π.
Μπίσκα	Π.Ε.	Ραμινιώτης	Θ.
Μπλάντα	Α.	Σάββας	Δ.
Μπότας	Μ.	Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη	Μ.
Μπόχτης	Δ.	Σακκάς	Χ.
Μπριασούλης	Δ.	Σαμαράς	Θ.
Μυγδάκος	Γ.	Σαπουντζάκης	Γ.
Μυγδάκος	Ε.	Σαπουντζής	Μ.
Μυστριώτης	Α.	Σγουμποπούλου	Α.
Νάνμος	Ν.	Σήμης	Α.
Νάνος	Γ.Δ.	Σκαμαγκούλης	Γ.
Νάτσης	Α.	Σούλης	Κ.
Νάτσης	Η.	Σπανομήτρος	Ι.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου	Χ.	Σταμούλης	Γ.
Ντάφας	Ε.	Σταυρινός	Ε.
Ντίνας	Γ.	Συλλαίος	Ν.
Ντιούδης	Ι.Π.	Τάνος	Α.
Ντιρογιάννης	Α.Γ.	Τζαμπύρας	Γ.
Ξανθόπουλος	Γ.	Τζελέπης	Γ.Σ.
Ξενάκης	Απ.	Τζιαφάς	Γ.
Ξένος-Κοκολέτσης	Π.	Τζιαχρής	Π.
Ξυραδάκης	Π.	Τζιγκούρας	Ι.
Παγανέλης	Γ.	Τίγκας	Δ.

Τοπάλογλου	X.	Φουντάς	Σ.
Τούλιος	Λ.	Φωτίδης	I.
Τούλιος	M.	Χαλασοχώρη	N.
Τρέσσος	K.Δ.	Χατζηγιαννάκης	E.
Τρυπαναγνωστόπουλος	I.	Χατζημιτσής	Δ.
Τσακίρης	Γ.	Χατζής	E.
Τσάντζος	Σ.	Χάχαλης	Δ.
Τσατσαρέλης	K.A.	Χισκάκης	M.
Τσιάνος	N.	Χουλιάρας	N.
Τσιούρης	Σ.	Χρίστου	O.
Τσιρίκογλου	Θ.	Ψυχογιού	Σ.
Τσιρογιάννης	I.Λ.	Blackmore	S.
Τσιρόπουλος	Z.	Brighton	J.L.
Τσιτσιγιάννης	A.	Draoui	B.
Τσολάκη	Γ.	Godwin	R.
Τσολάκης	N.	Griepentrog	H.W.
Φασουλή	B.	Rahil	M.H.
Φείδαρος	Δ.	Tadj	N.
Φιλίντας	Θ.Αγ.	Tchamitchian	M.
Φλωράς	Στ.	Tillett	N.

Ενότητα 3:

Αγροτικές Κατασκευές

(129)

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΦΩΤΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ

I. Κυρίκου, Δ. Μπριασούλης και Μ. Χισκάκης

¹ Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ.11855 Αθήνα, e-mail : briassou@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς φωτοδιασπώμενων φύλλων εδαφοκάλυψης (με βιολογικούς ή χημικούς μηχανισμούς) στο έδαφος. Ο συνολικός στόχος ήταν να διερευνηθούν τα ερωτήματα αυτά, με επιλεγμένες και τεκμηριωμένες μετρήσεις και αναλύσεις ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν παράλληλα πειράματα μελέτης της βιοδιάσπασης σε πραγματικές συνθήκες και σε εργαστηριακή κλίμακα. Η συμπεριφορά των φύλλων εδαφοκάλυψης με προοξειδωτικά δείχνει μια γρήγορη διάσπαση, ξαφνική και απότομη, σε πολύ λιγότερο χρονικό διάστημα από ότι στο PE.

EVALUATION OF DEGRADATION OF PHOTODEGRADABLE MULCHING FILMS

I. Kyrikou, D. Briassoulis and M. Hiskakis

¹ Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece, briassou@aua.gr

ABSTRACT

The object of this work concerns the study of behavior of photodegradable mulching in the soil. The total objective was to investigate their mechanism of degradation and their fate in the soil. For this parallel experiments of study of biodegradation in real conditions and in laboratorial scale were performed. The analyzed mulching films with pro-oxidants, showed different degradational behavior than common PE, that occurs rather abrupt and in shorter period of time.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πλαστικά είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες μπορεί να διαφοροποιηθούν ανάλογα με ότι οι καταναλωτές επιθυμούν και χρειάζονται [1]. Οι ποσότητες πλαστικών που χρησιμοποιούνται ετησίως σε όλο τον κόσμο στο γεωργικό τομέα ανέρχονται σε δύο εκατομμύρια τόνους [2]. Σχεδόν η μισή ποσότητα χρησιμοποιείται στην προστατευμένη καλλιέργεια. Η μεγάλη πλειοψηφία κυριαρχείται από την χρήση πλαστικών φύλλων με βάση το πολυαιθυλένιο (PE). Ειδικότερα, το low-density πολυαιθυλένιο (LDPE) είναι ο ευρύτετα χρησιμοποιημένος τύπος πολυαιθυλενίου, λόγω των σχετικά καλών μηχανικών και οπτικών ιδιοτήτων του, σε συνδυασμό με μια ανταγωνιστική τιμή αγοράς [3].

Δεδομένου ότι οι ποσότητες πλαστικών που χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι πολύ μεγάλες και κάθε έτος η χρήση αυξάνεται, το πρόβλημα διάθεσης των συσσωρευμένων γεωργικών πλαστικών αποβλήτων είναι ένα γεγονός και οι επιλογές υποβάθμισης και διάθεσης, ή ενδεχομένως η βιοδιάσπαση των χρησιμοποιημένων πολυμερών σωμάτων, είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα με οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές [4]. Πολλά συνθετικά πολυμερή παράγονται και χρησιμοποιούνται επειδή είναι ανθεκτικά στη χημική και φυσική διάσπαση και είναι αυτά που παρουσιάζουν κυρίως τα προβλήματα διάθεσης όταν παύει η χρησιμότητά τους. Ένας από τους εναλλακτικούς τρόπους της διάθεσης για τα γεωργικά πλαστικά απόβλητα είναι η βιοδιάσπαση. Για το σκοπό αυτό έχουν σχεδιαστεί και συντεθεί ειδικά πολυμερή σώματα [4-6]. Μη-διασπόμενα πολυμερή σε γεωργικές εφαρμογές όντας ανθεκτικά στην υποβάθμιση (ανάλογα με το είδος του πολυμερούς, τις πρόσθετες ουσίες που έχουν χρησιμοποιηθεί για να αυξηθεί η αντοχή τους και να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες τους κ.λπ.), τείνουν να συσσωρεύονται στο έδαφος εάν δεν συλλεχθούν για ανακύκλωση ή ανάκτηση ενέργειας, αλλά φρεζαρισθούν. Εναλλακτικά, η πιθανή φωτοδιάσπαση των φύλλων εδαφοκάλυψης από πολυαιθυλένιο σε μικρά θραύσματα μπορεί να οδηγήσει στη μόλυνση του χώματος και ρύπανση του περιβάλλοντος (συμπεριλαμβανομένης και της αισθητικής ρύπανσης). Ιδανικά, ένα διασπόμενο πολυμερές πρέπει να βιοδιασπάται πλήρως μην αφήνοντας καμία επιβλαβή ουσία στο περιβάλλον [7].

Από τα τέλη του 1980 γίνονται προσπάθειες σχεδιασμού πλαστικών υλικών που διασπώνται από μικροοργανισμούς. Τα πρώτα υλικά βασίστηκαν σε άμυλο και κυτταρίνη. Νέα υλικά, με απροσδιόριστες ιδιότητες διάσπασης στο έδαφος, εισάγονται ήδη σε γεωργική χρήση, χωρίς να έχει προηγηθεί εμπεριστατωμένη μελέτη του είδους της διάσπασης τους στο έδαφος και ενδεχομένως της απλής διάσπασης τους σε μικρά υπολείμματα και των πιθανών επιπτώσεων τους στη γεωργική παραγωγή, το εδαφικό σύστημα και το περιβάλλον. Τα κύρια τεχνικά προβλήματα που αφορούν στα βιοδιασπώμενα υλικά που έχουν γεωργικές εφαρμογές επικεντρώνονται στον προσδιορισμό του βαθμού και του ρυθμού της βιοδιάσπασης τους και αποδόμησης τους στο έδαφος καθώς και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [6].

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Υλικά

Τα φύλλα εδαφοκάλυψης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν ειδικά και βελτιστοποιήθηκαν για τις συγκεκριμένες γεωργικές εφαρμογές με προσθήκη προοξειδωτικών και UV σταθεροποιητών (το carbon black λειτουργεί και σαν UV σταθεροποιητής). Το συμβατικό φύλλο εδαφοκάλυψης πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αναφοράς σε αυτά τα πειράματα ήταν 25μ LLDPE (με την πρόσθετη ουσία μόνο carbon black) ενώ το πειραματικό φύλλο

εδαφοκάλυψης ήταν LDPE 20μ και που περιείχε συνδυασμό προοξειδωτικών και carbon black ως σταθεροποιητή (εμπορικός τύπος 6031).

2.2. Πειράματα πλήρους κλίμακας

Πειράματα πλήρους κλίμακας σχεδιάσθηκαν και πραγματοποιήθηκαν στον πειραματικό αγρό του εργαστηρίου, στο αγρόκτημα του Γ.Π.Α. στα Σπάτα. Συγκεκριμένα φυτεύθηκαν κλίνες με επιλεγμένη καλλιέργεια (καρπουζιού) και έγιναν συγκρίσεις μεταξύ καλλιεργείας χωρίς εδαφοκάλυψη και καλλιεργειών με την χρήση διαφορετικών φύλλων εδαφοκάλυψης (κοινού φύλλου πολυεθυλενίου για έλεγχο και φύλλων εδαφοκάλυψης με προοξειδωτικά). Ο κύριος στόχος ήταν η εκτίμηση της βιοδιάσπασης υπό πραγματικές συνθήκες (συσσώρευση - αποδόμηση των υλικών αυτών). Η επίδραση των εδαφικών και κλιματικών συνθηκών καταγράφηκε. Με το πέρας της καλλιεργείας (πάροδος τριών μηνών) τα διασπώμενα υλικά ενσωματώθηκαν στο έδαφος μαζί με τα φυτικά υπολείμματα και μελετήθηκε η εξέλιξη της βιοδιάσπασης ή χημικής αποδόμησης των συγκεντρούμενων ποσοτήτων υλικών στο έδαφος, με σειρά περιοδικών δοκιμών των υπολειμμάτων.

2.3. Πειράματα διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης

Η θερμότητα της τήξης των δειγμάτων αναλύθηκε από διαφορικό θερμιδόμετρο σάρωσης της εταιρείας Perkin Elmer (Differential Scanning Calorimeter Pyris 6). Η βαθμονόμηση του οργάνου έχει γίνει με ίνδιο. Συνολικά καταγράφηκαν θερμογράμματα διαδοχικών κύκλων θέρμανσης – ψύξης (α) μια πρώτη θέρμανση από -5 έως 200 °C, που ακολουθείται με (β) ψύξη από 200 έως -5 °C. Οι κύκλοι που καταγράφησαν ήταν τρεις. Ο πρώτος κύκλος φανερώνει τη θερμική ιστορία του δείγματος, ο δεύτερος είναι ο κύκλος που μας δείχνει την θερμότητα τήξης και τη μεταβολή και ο τρίτος κύκλος, ο οποίος είναι όμοιος με τον δεύτερο, γίνεται για επαλήθευση και έλεγχο των αποτελεσμάτων. Η ποσότητα των δειγμάτων ήταν περίπου 10 mg. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας κατά την θέρμανση και την ψύξη ήταν 10 °C/min κάτω από ατμόσφαιρα αζώτου. Σε κάθε θερμογράμμα υπολογίσθηκαν η θερμοκρασία τήξης και η μεταβολή της ενθαλπίας σε κάθε κύκλο (θερμότητα τήξης). Ο βαθμός κρυσταλλικότητας των δειγμάτων πολυαιθυλενίου υπολογίστηκε λαμβάνοντας ως θερμότητα τήξης για το καθαρό κρυστάλλικο πολυαιθυλένιο (PE 100%), 293.1 J/g [8].

2.4 Πειράματα Φασματοσκοπίας FTIR

Οι αναλύσεις FTIR εκτελέσθηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνική ATR. Η ανάλυση εκτελέστηκε σε ένα υπέρυθρο φασματόμετρο Bruker Tensor 27 εξοπλισμένο με κεφαλή ATR. Ελήφθησαν φάσματα από τα δείγματα που συλλέχθηκαν περιοδικά από τον αγρό (ανά εβδομάδα) στην περιοχή των 400-3500 cm⁻¹. Δεδομένου ότι οι ομάδες καρβονυλίων αποτελούν συνήθως τα περισσότερα από τα προϊόντα οξείδωσης στη θερμοοξειδωτική υποβάθμιση του πολυαιθυλενίου, η συγκέντρωση των ομάδων καρβονυλίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρακολούθηση της προόδου της υποβάθμισης, συνεπώς το ενδιαφέρον στράφηκε στην περιοχή καρβονυλίων (1700±1780 cm⁻¹). Η απορρόφηση των καρβονυλίων αποτελείται από τις διαφορετικές επικαλυπτόμενες ζώνες που αντιστοιχούν στα οξέα (1712 cm⁻¹), τις κετόνες (1723 cm⁻¹), τις αλδεΐδες (1730 cm⁻¹) και τις λακτόνες (1780 cm⁻¹) [8].

Ο δείκτης καρβονυλίων υπολογίστηκε ως αναλογία της απορρόφησης σε 1723 cm⁻¹ (το μέγιστο της κορυφής καρβονυλίων) και της απορρόφησης σε 1463 cm⁻¹ (CH₂ κορυφή scissoring).

2.4 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές δοκιμές έγιναν σε όργανο INSTRON. Τα δείγματα είχαν τοποθετηθεί για τεχνητή γήρανση σε ειδική συσκευή ακτινοβολίας UV (λάμπες UVA και UVB) σε συχνότητες που προσομοιάζουν το φυσικό ηλιακό φως αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης και σε σταθερή θερμοκρασία 50°C. Μετρήθηκαν η τάση εφελκυσμού και η επιμήκυνση θραύσεως σε παράλληλη και κάθετη διεύθυνση στα φύλλα εδαφοκάλυψης που συλλέγονταν περιοδικά (ανά εβδομάδα έκθεσης).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Πειράματα πλήρους κλίμακας

Τα πειράματα πλήρους κλίμακας πραγματοποιήθηκαν στον αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου στην περιοχή των Σπάτων για μια πλήρη καλλιεργητική περίοδο (3 μήνες). Χρησιμοποιήθηκε καλλιέργεια καρπουζιού. Στην *Εικόνα 1* παρουσιάζεται το φύλλο εδαφοκάλυψης στην αρχή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου.



Εικόνα 1. Φωτογραφίες των φύλλων εδαφοκάλυψης στον αγρό (α) στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου (β) στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου

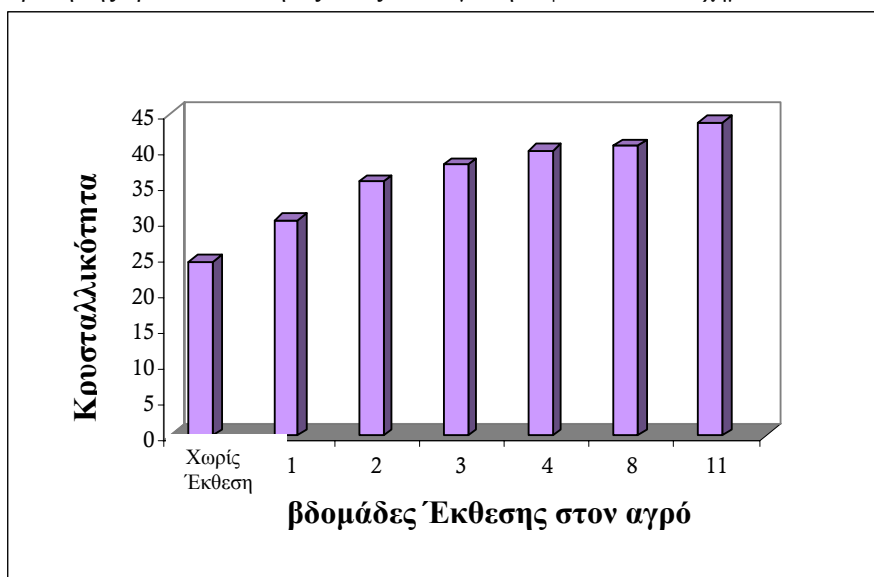
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 μετά το πέρας της καλλιεργητικής περιόδου, το φύλλο εδαφοκάλυψης έχει θρυμματισθεί.

3.2 Πειράματα διαφορικής θερμοδομετρίας σάρωσης

Εκτός από τις διαφορές στην καθαρότητα του πολυμερούς, που οφείλονται στην υποβαθμισή του, τα αποτελέσματα της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης επέτρεψαν την αξιολόγηση της θερμοκρασίας υποβάθμισης των υλικών. Το σημείο της κάμψης σε αυτήν την περιοχή αντιστοιχεί στη θερμοκρασία όπου η αρχίζει υποβάθμιση. Η θερμοκρασία οξείδωσης καθορίζεται μέσω των δυναμικών διαφορών της θερμοκρασίας. Επίσης κάθε δείγμα συμπεριφέρεται διαφορετικά. Οι τριτοταγείς άνθρακες (οι οποίοι σχηματίζονται μετά από τη διάσπαση) είναι σταθερότεροι από τους δευτεροταγείς και τους πρωτοταγείς, απαιτώντας κατά συνέπεια λιγότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να σχηματισθούν. Συνεπώς ένα πολυμερές με μεγαλύτερο αριθμό περιοχών διακλάδωσης (περισσότερες διακλαδώσεις στις αλυσίδες) θα οδηγούσε σε περισσότερους τριτοταγείς άνθρακες με συνέπεια λιγότερο σταθερά υλικά. Μετά από τα αρχικά στάδια της

γήρανσης δημιουργούνται πολικές ομάδες στο πολυαιθυλένιο (καρβοξύλια) καθώς chain scission και cross-linking.

Τα αρχικά υλικά παρουσίασαν ενδόθερμες κορυφές στους 113°C. Παρατηρήθηκαν λόγω της υποβάθμισης νέες κορυφές ενεργειακής απορρόφησης καθώς και παρουσιάζεται μια διεύρυνση της ενδοθερμικής γραφικής παράστασης. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στις αλλαγές στο μέγεθος κρυσταλλικότητας και στις διαφορές του μοριακού βάρους που επέρχονται από το σπάσιμο των αλυσίδων των πολυμερών και σε και δεύτερο βαθμό επανακρυσταλλικοποίηση του πολυμερούς. Η μεταβολή της κρυσταλλικότητας όπως υπολογίστηκε φαίνεται στο Σχήμα 1.

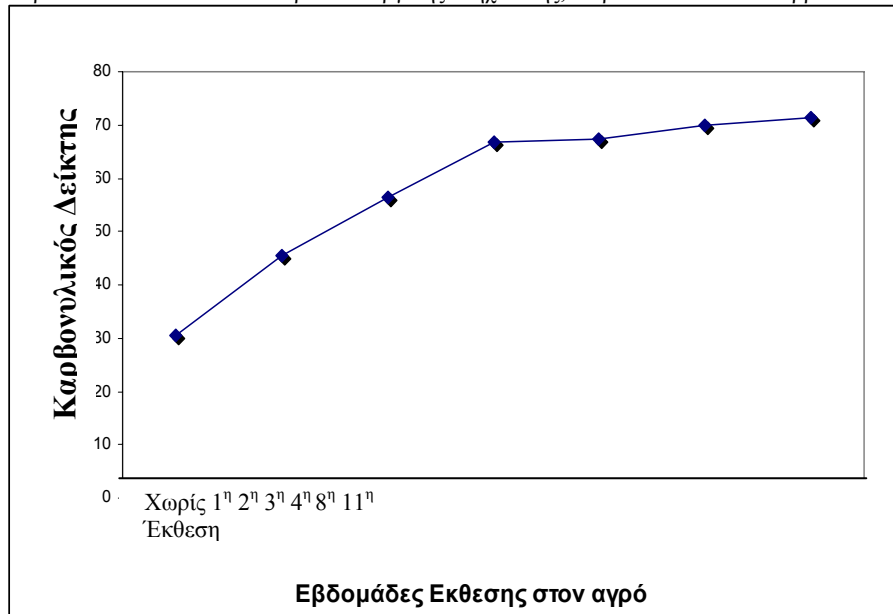


Σχήμα 1: Μεταβολή της κρυσταλλικότητας του φύλλου εδαφοκάλυψης του πολυαιθυλενίου με προοξειδωτικά.

3.3 Πειράματα Φασματοσκοπίας FTIR

Η απορρόφηση των καρβονυλίων αποτελείται από τις διαφορετικές αλληλοεπικαλυπτόμενες ζώνες που αντιστοιχούν στα οξέα (1712 cm^{-1}), τις κετόνες (1723 cm^{-1}), τις αλδεΐδες (1730 cm^{-1}) και τις λακτόνες (1780 cm^{-1}).

Ο δείκτης καρβονυλίων υπολογίστηκε ως αναλογία της απορρόφησης σε 1723 cm^{-1} (το μέγιστο της κορυφής καρβονυλίων) και της απορρόφησης σε 1463 cm^{-1} (CH_2 κορυφή scissoring) σε δείγματα που είχαν εκτεθεί στον αγρό (Σχήμα 2).



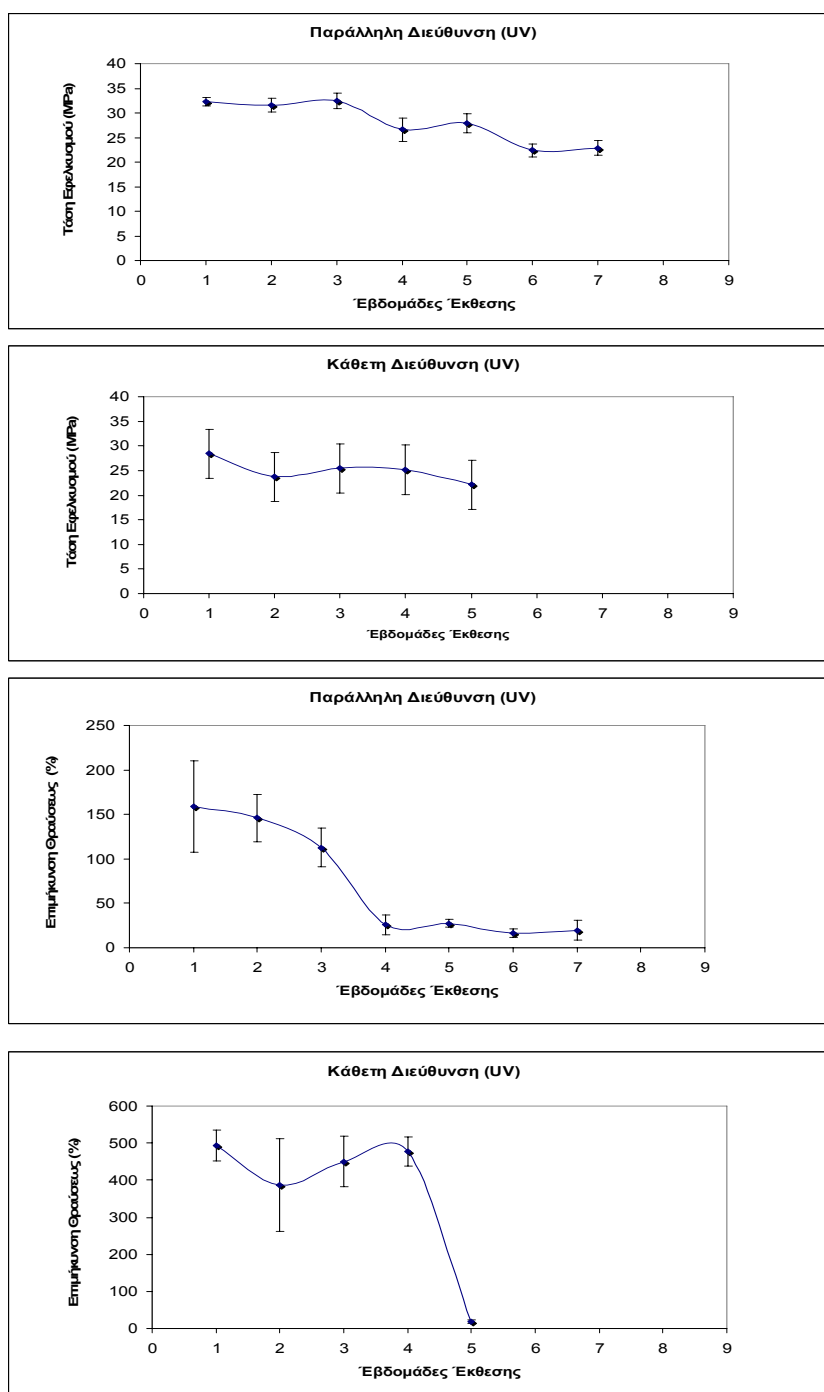
Σχήμα 2. Μεταβολή του καρβονυλικού δείκτη του φύλλου εδαφοκάλυψης του πολυαιθυλενίου με προοξειδωτικά (6031).

3.3 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες που μετρήθηκαν στα δείγματα που εκτέθηκαν σε συνθήκες εντατικής ακτινοβολίας UV στο εργαστήριο (Σχήμα 3) δείχνουν ότι τόσο στην παράλληλη όσο και στην κάθετη διεύθυνση, υπάρχει μία μείωση της οριακής αντοχής και ειδικά της παραμόρφωσης στη θραύση από την τέταρτη εβδομάδα έκθεσης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα FTIR που αφορούν τον καρβονυλικό δείκτη (Σχήμα 2) παρατηρείται συμφωνία μεταξύ του σχηματισμού των καρβονυλίων στο δείγμα (γήρανση) και της μηχανικής αποδόμησης όπως αυτή περιγράφεται ειδικά από τις καμπύλες της παραμόρφωσης στη θραύση [2,3]. Ειδικά στην εγκάρσια διεύθυνση μετά την πέμπτη εβδομάδα δεν μπορούν να γίνουν τα πειράματα γιατί το υλικό σπάζει πολύ εύκολα. Αυτή η συμπεριφορά εξηγεί τον μηχανισμό θρυμματισμού του υλικού σε δεδομένη χρονική στιγμή που καθορίζεται από το ποσό του προοξειδωτικού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά των φύλλων εδαφοκάλυψης με προοξειδωτικά στα πειράματα πλήρους κλίμακας που έγιναν σε πραγματικές συνθήκες στον αγρό, δείχνει μια γρήγορη διάσπαση, η οποία συμβαίνει ξαφνικά και απότομα, σε πολύ λιγότερο χρονικό διάστημα από ότι στο συμβατικό πολυαιθυλένιο. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην ύπαρξη και δράση των προοξειδωτικών στα φύλλα. Οι ιδιότητες που επηρεάζονται περισσότερο είναι οι μηχανικές ιδιότητες (θρυμματισμός), καθώς και η χημική σύσταση, με τη δημιουργία ομάδων καρβονυλίου, όπως φαίνεται από τη μεταβολή του καρβονυλικού δείκτη και τις διαφορές στην κρυσταλλικότητα.



Σχήμα 3. Μεταβολή των μηχανικές ιδιοτήτων του φύλλου εδαφοκάλυψης του πολυαιθυλενίου με προοξειδωτικά (6031) κατά τη διάρκεια της έκθεσης του σε ισχυρή ακτινοβολία UV και θερμοκρασία 50°C στο εργαστήριο.

Αυτό που μένει πλέον να μελετηθεί είναι τι γίνονται αυτά τα μικρά κομμάτια των φυλλων, αν και κατά πόσον βιοδιασπώνται και με ποιο ρυθμό και πως επηρεάζουν την οικολογία του εδάφους (πιθανή ύπαρξη οικοτοξικότητας). Η έρευνα που αφορά στην πιθανή βιοδιάσπαση ή όχι των υπολειμμάτων (θρυμμάτων) αυτών των υλικών στο έδαφος είναι υπό εξέλιξη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση - Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και από Εθνικούς Πόρους - ΕΠΕΑΕΚ II.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Albertsson A.C., Barnstedt C. Karlsson S. 1995. Degradation of enhanced environmentally degradable propylene in biological aqueous media: mechanisms during the first stages, *J. Appl. Polym Sci*, 51:1097-1105.
2. Dilara P.A, Briassoulis D. 2000. Degradation and Stabilization of Low-Density Polyethylene films used as greenhouse covering materials, *J. Agr. Eng. Res* 76: 309-321.
3. Briassoulis D. 2005. The effects of tensile stress and the agrochemical Vapam on the ageing of low density polyethylene (LPDE) agricultural films. Part I. Mechanical behavior, *Polymer Degradation and Stability*, 88:489-503.
4. Chandra R., Rustgi R. 1998. Biodegradable Polymers, *Programming Polymer Science*, 23:1273-1335.
5. Stevens E.S., 2002. *Green Plastics: An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics*, Princeton University Press.
6. Stevens E.S. 2002. How Green are plastics?, *Biocycle* 43(12): 42-45.
7. Goldstein, N & Block, D. 2000. Sorting out the Plastic, *Biocycle - Journal of Composting and Organics Recycling*, 41(8):40-44.
8. Khabbaz F., Albertsson A-C, Karlsson S. 1999. Chemical and morphological changes of environmentally degradable polyethylene films exposed to thermo-oxidation, *Polymer Degradation and Stability* 63:127-138.

(148)

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ

Γ. Ντίνας, Π. Κούγιας, Χ. Νικήτα- Μαρτζοπούλου

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Εργαστήριο Γεωργικών
Κατασκευών και Εξοπλισμού, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη,
e-mail: gntinas@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας με τη χρήση ενός παθητικού ηλιακού συστήματος που αποτελείται από πλαστικές σακούλες με νερό και πλαστικούς σωλήνες PE σε ένα θερμοκήπιο με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας. Οι πλαστικές σακούλες αξιοποιούν ένα σημαντικό ποσοστό τόσο της άμεσης όσο και της έμμεσης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως αποθήκες θερμότητας. Από την έρευνα αυτή διαπιστώθηκε ότι με την εφαρμογή του συγκεκριμένου παθητικού ηλιακού συστήματος μειώθηκε η χρήση συμβατικών καυσίμων για τις ανάγκες θέρμανσης του θερμοκηπίου.

ENVIROMENTAL CONTROL IN GREENHOUSES USING ENERGY SAVING SOLAR SYSTEM COMBINED WITH HYDROPONY

G. Ntinias, P. Kougiyas, Ch. Nikita- Martzopoulou

Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Laboratory of Agriculture
Structures and Equipment, T.K. 54006, Thessaloniki
e-mail: gntinas@agro.auth.gr

ABSTRACT

The present work investigates the possibility of energy saving using passive solar sleeves filled with water and PE plastic tubes in a greenhouse, where tomato is cultivated hydroponically. The passive solar sleeves exploit an important percentage of direct and indirect radiation and they act as deposits of heat. The conclusion of this research is that the use of conventional fuels for the needs of greenhouse heating was decreased with the installation of the particular passive solar system.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια έχουν ως κύριο σκοπό την παραγωγή αγροτικών προϊόντων εκτός εποχής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την προοδευτική αύξηση των εκτάσεων που καλύπτονται από θερμοκηπιακές καλλιέργειες οδήγησε σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων για θέρμανση και δροσισμό προσεγγίζουν το 1.5% του ευρωπαϊκού συνολικού ενεργειακού προϋπολογισμού [1]. Ακόμα και στις νότιες ευρωπαϊκές χώρες, όπου επικρατούν ευνοϊκότερες κλιματικές συνθήκες, οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις που είναι εξοπλισμένες με συστήματα θέρμανσης καταναλώνουν κατά μέσο όρο 7.5 l καυσίμου/ m²/ έτος [2]. Σύμφωνα με μελέτες που διεξήχθησαν σε στρατηγικές θέρμανσης θερμοκηπίων έδειξαν ότι το κόστος θέρμανσης υπερβαίνει το 30% του συνολικού κόστους λειτουργίας των θερμοκηπίων [3].

Η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μείωση του ενεργειακού κόστους στα θερμοκήπια, οδήγησε σε εκτενείς προσπάθειες αξιοποίησης των ήπιων μορφών ενέργειας όπως είναι η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα και η ηλιακή ενέργεια [4]-[5].

Με τη χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης, όπως το παθητικό ηλιακό σύστημα με πλαστικές σακούλες με νερό, μπορεί να επιτευχθεί μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από πλαστικές, λείες και εύκαμπτες σακούλες πολυαιθυλενίου, οι οποίες είναι πληρωμένες με νερό και τοποθετούνται κατά μήκος των σειρών των φυτών. Η βασική αρχή λειτουργίας του είναι ότι, κατά τη διάρκεια της ημέρας το παθητικό ηλιακό σύστημα συλλέγει μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στις σακούλες θερμαίνοντας το περιεχόμενο νερό και συνεπώς λειτουργεί ως αποθήκη θερμότητας. Η αποθηκευμένη αυτή θερμότητα απελευθερώνεται στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου εφόσον η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του νερού της σακούλας σωλήνα πολυαιθυλενίου.

Στην παρούσα έρευνα αξιολογήθηκε η απόδοση ενός παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης θερμοκηπίου συνδυασμένου με υδροπονική εγκατάσταση κατά την καλλιεργητική περίοδο της άνοιξης. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε η εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση παθητικού ηλιακού συστήματος πλαστικών σακούλων με νερό κατά τα χρονικά διαστήματα που απαιτείται θέρμανση. Ακόμα ελέγχθηκε η επίδραση του συστήματος αυτού στη ρύθμιση του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Τέλος μελετήθηκαν οι επιπτώσεις στη βλαστική ανάπτυξη των φυτών της υδροπονικής καλλιέργειας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε την Άνοιξη και συγκεκριμένα κατά τους μήνες Μάρτιο μέχρι Μάιο του 2007 σε τροποποιημένο τοξωτό πειραματικό θερμοκήπιο του Κέντρου Ελέγχου Γεωργικών Κατασκευών, (Κ.Ε.Γ.Κ.), που λειτουργεί υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Εξοπλισμού, στο αγρόκτημα του Α.Π.Θ. Ο σκελετός του θερμοκηπίου αποτελείται από γαλβανισμένο σίδερο ενώ το υλικό κάλυψης από πλαστικό πολυαιθυλένιο, (PE). Το συνολικό εμβαδό του θερμοκηπίου είναι 144m² και για το σκοπό του πειράματος χωρίστηκε σε δύο ίσα τμήματα των 70m² με ενδιάμεσο διαχωριστικό διάδρομο. Για τις ανάγκες αερισμού του θερμοκηπίου υπήρχε ένα πλαϊνό παράθυρο και ένα οροφής το οποίο είχε ρυθμιστεί να λειτουργεί αυτόματα. Η κρίσιμη τιμή θερμοκρασίας για τη λειτουργία του παραθύρου οροφής ήταν 23°C άνω της οποίας το παράθυρο άνοιγε και κάτω της οποίας έκλεινε σταδιακά. Το έδαφος του θερμοκηπίου καλύφθηκε με λευκό πλαστικό εδαφοκάλυψης.

Το λευκό χρώμα επιλέχθηκε με σκοπό την αντανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο πειραματικό μέρος εγκαταστάθηκε παθητικό ηλιακό σύστημα κατά μήκος των πέντε σειρών των φυτών. Το παθητικό ηλιακό σύστημα απαρτίζονταν από δύο μέρη: α)μία κυλινδρική πλαστική σακούλα PE που πληρώθηκε με νερό και β)δύο περιφερειακούς σωλήνες PE, εκατέρωθεν της σακούλας, τους οποίους διαπερνούσε ρεύμα αέρα προερχόμενο από την αεραντλία. Μεταξύ των περιφερειακών σωλήνων και πάνω στην πλαστική σακούλα τοποθετήθηκαν πλάκες πετροβάμβακα μήκους 1m. Οι κυλινδρικοί σωλήνες είχαν κατά μήκος οπές από τις οποίες εξερχόταν μέρος του περιεχόμενου αέρα προς τις πλάκες πετροβάμβακα. Η παροχή της αεραντλίας εξασφάλιζε απόλυτη πληρότητα του εσωτερικού όγκου των περιφερειακών σωλήνων με αέρα. Οι περιφερειακοί σωλήνες χρησιμοποιούνταν ως πλαϊνά τοιχώματα για την απομάκρυνση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος. Η θέρμανση του πειραματικού μέρους γινόταν με το παθητικό ηλιακό σύστημα και εφόσον δεν μπορούσαν να καλυφθούν οι απαιτήσεις θέρμανσης λειτουργούσε συμπληρωματικά το συμβατικό σύστημα με καυστήρα πετρελαίου.

Στο μάρτυρα οι πλάκες πετροβάμβακα τοποθετήθηκαν πάνω σε πλαστική υδρορροή και οι ανάγκες θέρμανσης καλύπτονταν εξολοκλήρου από το συμβατικό σύστημα θέρμανσης με καυστήρα πετρελαίου. Η κρίσιμη τιμή θερμοκρασίας για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης ήταν 16°C. Το έδαφος του θερμοκηπίου καλύφθηκε με λευκό πλαστικό εδαφοκάλυψη. Η απορροή του θρεπτικού διαλύματος αν οδηγηθεί στο έδαφος προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα [6]. Για το λόγο αυτό και στα δύο μέρη του θερμοκηπίου το θρεπτικό διάλυμα που απέρρεε συγκεντρωνόταν σε υπόγειες δεξαμενές.

Η υδροπονική καλλιέργεια τόσο του πειράματος όσο και του μάρτυρα αποτελούνταν από 105 φυτά τομάτας (υβρίδιο Optima sp.). Σε κάθε πλάκα πετροβάμβακα τοποθετήθηκαν 3 φυτά σε απόσταση 20cm μεταξύ τους. Η άρδευση των φυτών γινόταν με θρεπτικό διάλυμα, μέσω μικροσωληνίσκων. Σε κάθε παρασκευή θρεπτικού διαλύματος γινόταν μέτρηση του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Portable pH/mV/°C Meter HANNA Instruments HI8424
- Portable Multi- Range Conductivity/TDS Meters HANNA Instruments HI8733

Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος προσαρμόστηκε ένα σύστημα μέτρησης και καταγραφής των ακόλουθων δεδομένων: 1) της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου, 2) της θερμοκρασίας του πετροβάμβακα, 3) της θερμοκρασίας του νερού που περιέχεται μέσα στο φιλμ πολυαιθυλενίου και 4) της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο ηλιακής ακτινοβολίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης ήταν:

- 14 αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου PT-100, (1 αέρα, 12 υποστρώματος και 1 νερού).
- Ένα πυρανόμετρο τάξης A.
- 4 αισθητήρες υγρασίας- θερμοκρασίας αέρα (HOBO H8).
- 1 αισθητήρας υγρασίας- θερμοκρασίας αέρα (HOBO PRO)
- Ολοκληρωμένος εξωτερικός μετεωρολογικός σταθμός, ο οποίος αποτελείται από ανεμόμετρο, ανεμοδείκτη, θερμόμετρο, πυρανόμετρο και υγρασιόμετρο.

Η συλλογή και η επεξεργασία των μετρήσεων γινόταν σε καταγραφικό δεδομένων (Data logger CR10) το οποίο ήταν συνδεδεμένο με υπολογιστή στο Κ.Ε.Γ.Κ.. Ο υπολογιστής είχε εγκατεστημένο λογισμικό, το οποίο υποστήριζε τη λήψη και καταγραφή των δεδομένων. Οι μετρήσεις τόσο από τους αισθητήρες θερμοκρασίας όσο και από το πυρανόμετρο καταγράφονταν ανά 5 λεπτά, ενώ παράλληλα υπήρχε η δυνατότητα παρακολούθησης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Οι αισθητήρες υγρασίας- θερμοκρασίας λειτουργούσαν αυτόνομα και κατέγραφαν τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου ανά 5 λεπτά. Στον ίδιο υπολογιστή κατέληγαν και οι μετρήσεις από τον μετεωρολογικό σταθμό. Για τον υπολογισμό των ωρών λειτουργίας του καυστήρα πετρελαίου εγκαταστάθηκαν δύο ωρομετρητές στον πίνακα ελέγχου του θερμοκηπίου.

Ακόμη, έγινε σύγκριση της βλαστικής ανάπτυξης των φυτών στο πειραματικό μέρος και στο μάρτυρα. Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκαν το ύψος των φυτών και η περίμετρος των βλαστών με συχνότητα μέτρησης ανά 10 μέρες. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 15 φυτά του πειραματικού μέρους και 15 στο μάρτυρα (Σχήμα 2).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται στον πίνακα 1 το σύνολο ωρών λειτουργίας του καυστήρα πετρελαίου, από 1 Μαρτίου μέχρι 31 Μαΐου, για το μάρτυρα ανήλθε σε 226.46 ώρες. Στο πειραματικό μέρος, στο οποίο εγκαταστάθηκε παθητικό ηλιακό σύστημα, η θέρμανση με συμβατικό καύσιμο ήταν συμπληρωματική. Ο ωρομετρητής κατέγραψε 144.88 ώρες συνολικής λειτουργίας του καυστήρα για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης. Δεδομένου ότι η έρευνα διεξήχθη κατά την ανοιξιιάτικη καλλιεργητική περίοδο, οι ανάγκες θέρμανσης προοδευτικά μειώνονταν.

Πίνακας 1. Σύνολο ωρών λειτουργίας του καυστήρα πετρελαίου για το χρονικό διάστημα 1^{ης} Μαρτίου έως 31^{ης} Μαΐου 2007

	ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΕ ΩΡΕΣ		ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
	ΠΕΙΡΑΜΑ	ΜΑΡΤΥΡΑΣ	
ΜΑΡΤΙΟΣ	89.03	126.7	37.67
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	54.86	92.19	37.33
ΜΑΪΟΣ	0.99	7.57	6.58
ΣΥΝΟΛΟ	144.88	226.46	81.58

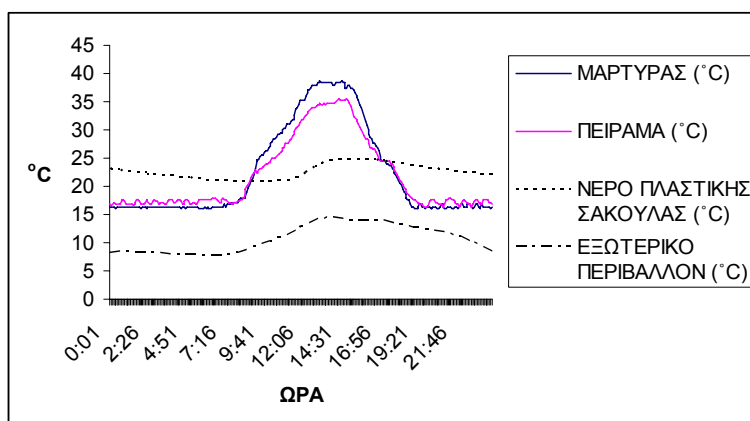
Όπως διαπιστώνεται στο πείραμα η λειτουργία του καυστήρα εμφανίζεται μειωμένη σημαντικά για κάθε μήνα. Στο σύνολο των ημερών διεξαγωγής της έρευνας η διαφορά στο χρονικό διάστημα λειτουργίας ανήλθε σε 81.58 ώρες.

Στον πίνακα 2 φαίνεται η μηνιαία και η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση του παθητικού ηλιακού συστήματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων το ποσοστό εξοικονόμησης ήταν αρκετά σημαντικό και ικανό για τη μείωση του ενεργειακού κόστους του θερμοκηπίου. Θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι η χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων με πλαστικές σακούλες με νερό σε θερμοκήπια μπορεί να εξοικονομήσει έως και 8% της εισερχόμενης ενέργειας [7].

Πίνακας 2. Μηνιαία και συνολική εξοικονόμηση ενέργειας, (%)

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (%)	
MΑΡΤΙΟΣ	29.7
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	40.4
ΜΑΪΟΣ	86.9
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	36.0

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα στα δύο τμήματα του θερμοκηπίου, στον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος και στο νερό της πλαστικής σακούλας κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου της 17.3.2007. Όπως φαίνεται η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος του πειράματος για το πρώτο οκτάωρο της ημέρας ήταν περίπου 1°C υψηλότερη από αυτή του μάρτυρα. Για το ίδιο χρονικό διάστημα παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον του μάρτυρα ήταν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χαμηλότερη από την κρίσιμη τιμή των 16°C με αποτέλεσμα την καύση πετρελαίου για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης. Στις 16.20 όπου η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος αρχίζει να πέφτει παρατηρείται ότι η πτώση της θερμοκρασίας του αέρα στο μάρτυρα είναι πιο απότομη. Αντίθετα, στο πειραματικό τμήμα του θερμοκηπίου, λόγω της παρουσίας παθητικού ηλιακού συστήματος, η πτώση θερμοκρασίας του αέρα είναι πιο ομαλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη, υπό μορφή θερμότητας, στις πλαστικές σακούλες, μεταδίδεται με αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα να διατηρεί υψηλότερη τη θερμοκρασία του αέρα.



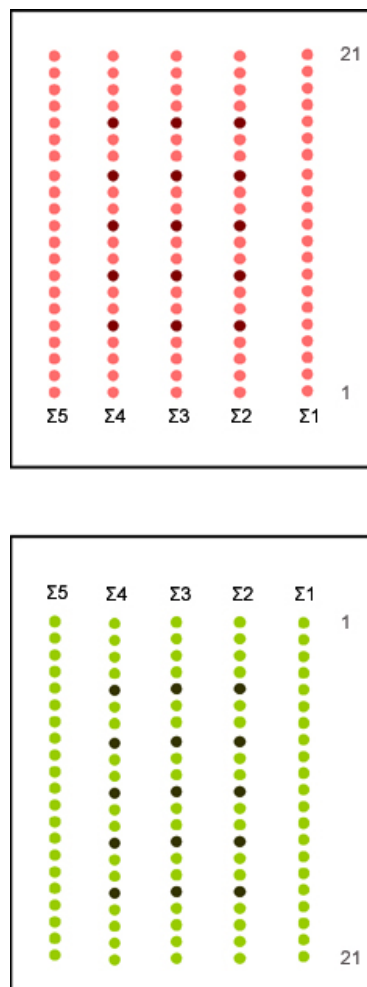
Σχήμα 1. Διαφοροποίηση της θερμοκρασίας του αέρα των δύο τμημάτων κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου

Στον πίνακα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης στη βλαστική ανάπτυξη της υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας. Η πλαστική σακούλα πολυαιθυλενίου, με τη δομή που είχε, συνετέλεσε στην αναδιανομή του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα να επιτευχθούν ομοιόμορφες συνθήκες περιβάλλοντος. Η σωστή θερμοκρασία, υγρασία και εναλλαγή του ατμοσφαιρικού αέρα είναι βασικά κριτήρια για την ανάπτυξη των βλαστών και των

φύλλων των φυτών. Από τις μετρήσεις στο πειραματικό μέρος και στο μάρτυρα (σχήμα 2) προέκυψε ότι τα φυτά τομάτας στο πειραματικό μέρος παρουσίασαν ταχύτερη βλαστική ανάπτυξη.

Πίνακας 3. Διαφοροποίηση ύψους (cm) και περιμέτρου (cm) των φυτών τομάτας στο πείραμα και στο μάρτυρα, στο τέλος του πειράματος.

ΘΕΣΗ ΦΥΤΟΥ	ΥΨΟΣ ΦΥΤΩΝ (cm)		ΠΕΡΙΜΕΤΡΟΣ ΦΥΤΩΝ (cm)	
	ΠΕΙΡΑΜΑ	ΜΑΡΤΥΡΑΣ	ΠΕΙΡΑΜΑ	ΜΑΡΤΥΡΑΣ
2.5	220	160	6.5	6.8
2.8	180	178	7	6.5
2.11	200	178	6.6	6.4
2.14	200	185	7.4	7.2
2.17	200	175	7.6	6.8
3.5	210	160	7.3	6.7
3.8	195	175	7.5	6.6
3.11	200	165	7.1	7.1
3.14	190	165	6.8	6.9
3.17	200	160	7.4	6.7
4.5	205	185	6.7	7.2
4.8	195	165	6.6	7
4.11	195	174	7.4	6.8
4.14	180	185	7.1	7.2
4.17	195	180	6.4	7
M.O.	197.67	172.67	7.03	6.86
ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ (%)	12.65		2.37	



Σχήμα 2. Αρίθμηση των φυτών και των σειρών. Κάθε σειρά (Σ) περιλαμβάνει 21 φυτά. Με έντονο χρώμα σημειώνονται τα φυτά που συμμετείχαν στις μετρήσεις.

Τα φυτά τομάτας στο πειραματικό μέρος είχαν ύψος κατά μέσο όρο 197.67cm, ενώ στο μάρτυρα 172.67cm, είχαν δηλαδή διαφοροποίηση σε σχέση με εκείνα του μάρτυρα της τάξης του 12.65%. Στη μέτρηση της περιμέτρου που πραγματοποιήθηκε σε ύψος 10cm στο βλαστό, παρατηρήθηκε μικρή διαφοροποίηση της τάξης του 2.37%. Δηλαδή, στο πειραματικό μέρος ο μέσος όρος περιμέτρου βρέθηκε 7.03cm, ενώ στο μάρτυρα ήταν 6.86cm.

Συμπερασματικά το σύστημα θέρμανσης που μελετήθηκε, μείωσε σημαντικά το ενεργειακό κόστος για τις ανάγκες θέρμανσης του θερμοκηπίου και επέδρασε θετικά στην ανάπτυξη των φυτών της καλλιέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Santamouris M., Balaras C.A., Daskalaki E. and Vallindras M., 1994. Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(5): 411-426.

2. Caouris Y., Kittas C., and Santamouris M., 1989. Regional monthly estimation of greenhouses energy consumption: application to Greece. *Solar & Wind Techn.* 6(3): 225-233.
3. Santamouris M., Argiriou A. and Vallindras M., 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse, *Solar Energy*, 52(5): 371-378.
4. Kittas K., Papadakis G., Bartzanas Th. and Giaglaras P., 1999. Renewable Energy Sources and Energy Saving in Mediterranean Greenhouses. *Proc. of Energy and Agriculture towards the Third Millennium*, Athens, Greece 1999.
5. Nikita-Martzopoulou C., 2002. Agricultural Aspects of Geothermal Heating in Greenhouses. *Proc. of the International Course on Geothermal Energy for District Heating, Agricultural and Agro- Industrial Uses*, Thessaloniki, Greece 2002.
6. Σιώμος Α., 2001. *Καλλιέργεια λαχανικών στο θερμοκήπιο* Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 9 σελ.
7. Mavrogianopoulos G. and Kyritsis S., 1993. Analysis and performance of a greenhouse with water filled passive solar sleeves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:47-61.

(170)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ CO₂ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

**Δ. Βαφειάδης¹, Μ. Μπότας¹, Χ. Παπαμάνθος¹ και Χ. Νικήτα-
Μαρτζοπούλου¹**

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Εργαστήριο Γεωργικών
Κατασκευών και Εξοπλισμού, Τ.Κ.: 54124, Θεσσαλονίκη,
e-mail: dvaf@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή διερευνά την επίδραση της υγρασίας στον εμπλουτισμό των θερμοκηπίων με CO₂. Η εφαρμογή εμπλουτισμών με CO₂ απαιτεί κάποια απαραίτητα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το θερμοκήπιο παραμένει κλειστό χωρίς αερισμό. Αν κατά τη διάρκεια αυτών των διαστημάτων η σχετική υγρασία δεν ξεπερνά τα άριστα επίπεδα, επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή διάρκεια εμπλουτισμού χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η ανάπτυξη των φυτών. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε το συμπέρασμα ότι η υγρασία δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα του εμπλουτισμού με CO₂.

INFLUENCE OF HUMIDITY ON CO₂ ENRICHMENT OF GREENHOUSES DURING THE SPRING CULTIVATION PERIOD

**D. Vafiadis¹, M. Botas¹, Ch. Papamanthos¹ and Ch. Nikita-
Martzopoulou¹**

¹Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, Lab. of Agricultural
Structures and Equipment, 54124, Thessaloniki, e-mail: dvaf@agro.auth.gr

ABSTRACT

This work investigates the influence of humidity in the CO₂ enrichment of greenhouses. The application of CO₂ enrichment demands some necessary time periods at which the greenhouse is kept with no ventilation. In the case that the relative humidity doesn't exceed the optimum levels the maximum possible enrichment duration is succeeded without any negative influence on plants growth. The analysis of the results concluded that the humidity is not a restricted factor of the CO₂ enrichment. ,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υγρασία αποτελεί έναν από τους τέσσερις βασικούς παράγοντες του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και η μεταβολή της επηρεάζει άμεσα και έμμεσα τα φυτά. Η άμεση επίδραση της υγρασίας αφορά κυρίως τη λειτουργία της διαπνοής, τη φωτοσύνθεση και τη γενικότερη ανάπτυξη των φυτών, ενώ η έμμεση επίδραση αφορά την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Τα άριστα επίπεδα σχετικής υγρασίας για την ανάπτυξη των περισσότερων καλλιεργούμενων C3 φυτών στα θερμοκήπια κυμαίνονται από 70 έως 80%, [1].

Ο εμπλουτισμός των θερμοκηπίων με CO₂ αποτελεί μία τεχνική η οποία οδηγεί σε θεαματική αύξηση της παραγωγής, καθώς και στη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των εμπλουτισμών, τα θερμοκήπια παραμένουν δίχως αερισμό για κάποιο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την άνοδο της σχετικής υγρασίας, εξαιτίας της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης του νερού από το έδαφος. Η αποτελεσματικότητα του εμπλουτισμού εξαρτάται από τη διάρκεια εφαρμογής του, η οποία καθορίζεται κυρίως από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία. Αν η σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών ανέρχεται πάνω από τα θεμιτά επίπεδα, τότε ο εμπλουτισμός πρέπει να διακόπτεται για αερισμό του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συνολικός χρόνος εφαρμογής του και κατ' επέκταση η αποτελεσματικότητά του.

Η ανοιξιάτικη καλλιεργητική περίοδος επιλέχθηκε ως χρονική περίοδος έρευνας, καθώς το 75-95% της συνολικής ετήσιας θερμοκηπιακής παραγωγής κηπευτικών προϊόντων στην Ελλάδα προέρχεται από αυτήν την περίοδο, [2].

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σκοπός της έρευνας είναι να διαπιστωθεί αν η υγρασία αποτελεί περιοριστικό παράγοντα του εμπλουτισμού με CO₂, κατά την καλλιεργητική περίοδο της άνοιξης. Τα χρονικά διαστήματα τα οποία επιλέχθηκαν, σύμφωνα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις ήταν ο Μάιος και ο Ιούνιος του 2004. Με την επιλογή αυτών των χρονικών διαστημάτων και λαμβάνοντας υπόψη και το μεταβαλλόμενο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας μελετήθηκαν δύο συνδυασμοί των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν τη διακύμανση της σχετικής υγρασίας. Συγκεκριμένα:

- ο Καλλιέργεια με μικρή ως μεσαία ανάπτυξη και θερμοκρασίες κυμαινόμενες από χαμηλά σε μεσαία ως υψηλά επίπεδα, (χρονική περίοδος του Μαΐου).
- ο Καλλιέργεια με μεσαία ως υψηλή ανάπτυξη και θερμοκρασίες σε υψηλά επίπεδα, (χρονική περίοδος του Ιουνίου).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο του Κέντρου Ελέγχου Γεωργικών Κατασκευών (Κ.Ε.Γ.Κ.), που λειτουργεί υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Εξοπλισμού, στο αγρόκτημα του Α.Π.Θ.. Πρόκειται για ένα τροποποιημένο τοξωτό πολλαπλό πειραματικό θερμοκήπιο έκτασης 140 m² με υλικό κάλυψης το πολυαιθυλένιο. Το έδαφος του θερμοκηπίου καλύφθηκε με μαύρο υδατοδιαπερατό πλαστικό εδαφοκάλυψης και εγκαταστάθηκε καλλιέργεια αποτελούμενη από 75 φυτά πιπεριάς και 75 φυτά τομάτας. Το CO₂ προερχόμενο από φιάλη χωρητικότητας 35Kg, διανέμονταν στο χώρο του θερμοκηπίου με τη βοήθεια ενός δικτύου σωληνώσεων μέσα στις σειρές των φυτών και σε ύψος 0.5 m από το έδαφος. Οι σωλήνες είχαν στο κάτω μέρος τους οπές ανά ένα μέτρο. Ένας εκτονωτής πίεσης

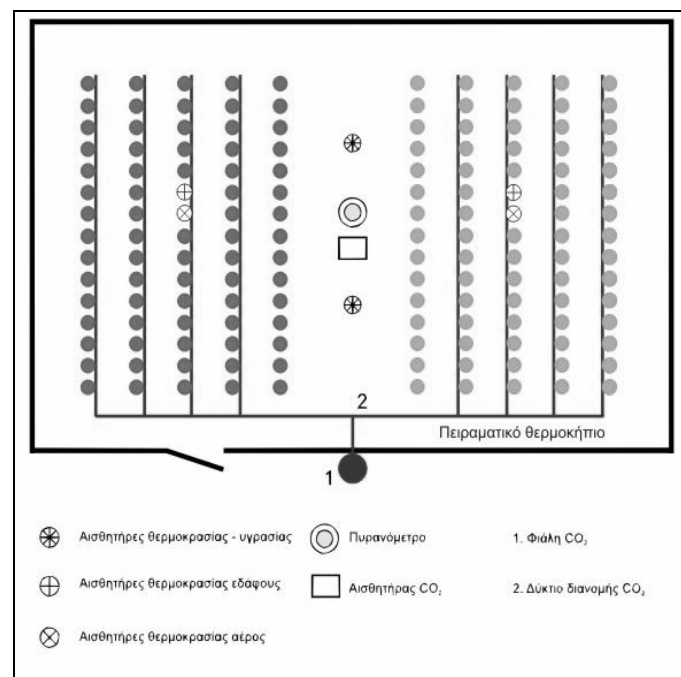
βοηθούσε την ομαλή ροή του CO₂ καθώς αυτό βρισκόταν υπό πίεση σε υγρή μορφή, (σχήμα 1).

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα μετρήσεων:

- 4 αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου PT-100, (2 αέρος, 2 εδάφους).
- Ένας αισθητήρας CO₂ (Double Beam Infrared CO₂ Analyzer).
- Ένα πυρανόμετρο τάξης Α.
- 2 αισθητήρες υγρασίας-θερμοκρασίας αέρα (HOBO H8).
- Ολοκληρωμένος εξωτερικός μετεωρολογικός σταθμός, ο οποίος αποτελείται από ανεμόμετρο, ανεμοδείκτη, θερμόμετρο, πυρανόμετρο και υγρασιόμετρο.

Η συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων γινόταν σε καταγραφικό δεδομένων (Data logger CR10), το οποίο ήταν συνδεδεμένο με υπολογιστή στο Κ.Ε.Γ.Κ.. Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες θερμοκρασίας καταγράφονταν ανά 10 λεπτά, του πυρανόμετρου ανά 5 λεπτά, του αισθητήρα CO₂ ανά 1 λεπτό. Το πρόγραμμα του υπολογιστή έδινε τη δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Οι αισθητήρες υγρασίας λειτουργούσαν αυτόνομα και κατέγραφαν τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία και τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα του θερμοκηπίου ανά 4 λεπτά. Από τις μετρήσεις των αισθητήρων υγρασίας επιλέχθηκε ο μέσος όρος των τιμών της σχετικής υγρασίας.



Σχήμα 1. Κάτοψη του θερμοκηπίου και οι θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων

Η μέθοδος εμπλουτισμών η οποία εφαρμόστηκε είναι αυτή των υψηλών θερμοκρασιών, [3]-[5]. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ σε επίπεδα υψηλότερα από τα κανονικά, μετατοπίζεται η άριστη θερμοκρασία ανάπτυξης των περισσότερων C3 φυτών από τους 23°C στους 30-32°C, [6]-[8].

Οι παράγοντες που καθόριζαν τα χρονικά διαστήματα των εμπλουτισμών ήταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Τις πρωινές ώρες ως χρονικό διάστημα εμπλουτισμού, ορίστηκε το χρονικό διάστημα από το σημείο όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανέρχονταν πάνω από το σημείο ισοστάθμισης του φωτός μέχρι το σημείο όπου οι θερμοκρασίες υπερέβαιναν τους 30-32°C. Τις απογευματινές ώρες ως θερμοκρασία έναρξης των εμπλουτισμών τέθηκαν οι 27°C, καθώς ο ήλιος βρισκόταν στη δύση του και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δεν μπορούσε να ανέλθει πάνω από τους 30-32°C μετά από το κλείσιμο των παραθύρων. Στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας που καθόριζε τη διακοπή της διαδικασίας των εμπλουτισμών ήταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας χαμηλότερη από το σημείο ισοστάθμισης του φωτός). Στο μεσοδιάστημα της ημέρας ο εμπλουτισμός του θερμοκηπίου δεν ήταν εφικτός, καθώς οι θερμοκρασίες παρέμεναν σταθερά πάνω από τους 30°C. Κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών η συγκέντρωση του CO₂ διατηρούνταν στα 1000 ppm.

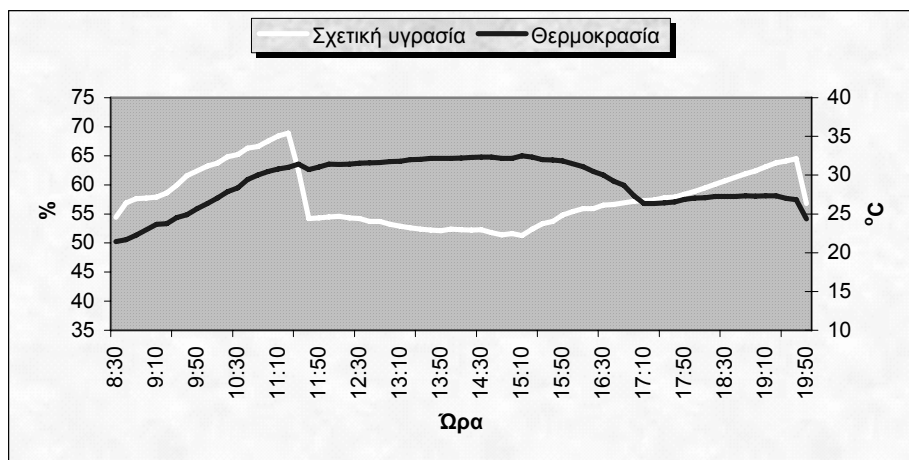
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά την έναρξη των εμπλουτισμών και τη διακοπή του αερισμού, η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κυμαινόταν από 45-65%. Μετά την έναρξη των εμπλουτισμών η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, αν και περιόριζε το ρυθμό αύξησης της σχετικής υγρασίας εξαιτίας της αύξησης της χωρητικότητας του αέρα σε υδρατμούς, δεν απέτρεπε την ανοδική της πορεία.

Η αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών σε όλη την πειραματική περίοδο κυμάνθηκε από 5 έως 22% ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και τη χρονική διάρκεια όπου το θερμοκήπιο παρέμενε κλειστό.

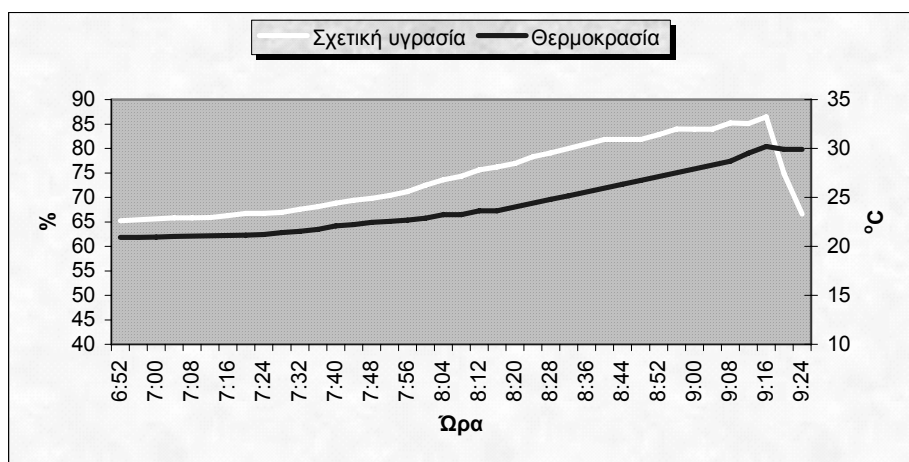
Πιο αναλυτικά, όταν τα φυτά ήταν σε μικρό στάδιο ανάπτυξης (1.5 μήνα μετά τη μεταφύτευση, αρχές με μέσα Μαΐου) ο εμπλουτισμός του θερμοκηπίου για χρονικό διάστημα έως 3.5 ώρες είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής υγρασίας έως 15%. Με δεδομένο ότι η σχετική υγρασία πριν από την έναρξη των εμπλουτισμών κυμαινόταν σε χαμηλά επίπεδα (45 έως 65%), η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών δεν ανήλθε ποτέ σε υψηλότερα από τα άριστα για την ανάπτυξη των φυτών επίπεδα (75-80%). Στο σχήμα 2, παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου για μία ενδεικτική ημέρα, (2 Μαΐου) με πρωινό και απογευματινό εμπλουτισμό.

Σύμφωνα με το σχήμα 2, η σχετική υγρασία κατά τον πρωινό εμπλουτισμό αυξήθηκε από το 54.4% στο 68.9% με διάρκεια εμπλουτισμού 2 ώρες και 50 λεπτά. Στο μεσοδιάστημα της ημέρας ο εμπλουτισμός του θερμοκηπίου δεν ήταν εφικτός, καθώς η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ακόμα και με συνεχή αερισμό παρέμενε σταθερά πάνω από τους 30°C. Στον απογευματινό εμπλουτισμό η σχετική υγρασία αυξήθηκε από το 57.3% στο 64.5%, όταν η διάρκεια του εμπλουτισμού ήταν 2 ώρες και 30 λεπτά.



Σχήμα 2. Μεταβολή της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας με εφαρμογή πρωινού και απογευματινού εμπλουτισμού στις 2.5.04

Όταν η καλλιέργεια ήταν σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, (περίοδος του Ιονίου) η σχετική υγρασία παρουσίασε μεγαλύτερη αύξηση και κυμαινόταν από 14-22% ανάλογα με τη χρονική διάρκεια των εμπλουτισμών. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών ξεπερνούσε τα άριστα επίπεδα για ένα μικρό χρονικό διάστημα (0.5 έως 1.5 ώρα), μόνο όταν η σχετική υγρασία πριν από την έναρξη του εμπλουτισμού κυμαινόταν από 60-65%. Η αύξηση ωστόσο της σχετικής υγρασίας πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα για ένα τόσο μικρό χρονικό διάστημα δεν ευνοεί την εξάπλωση φυτοπαθολογικών ασθενειών και επηρεάζει ελαχιστότατα την ανάπτυξη των φυτών. Στο σχήμα 3, δίνεται ένα αντίστοιχο παράδειγμα πρωινού εμπλουτισμού αυτής της περιόδου.



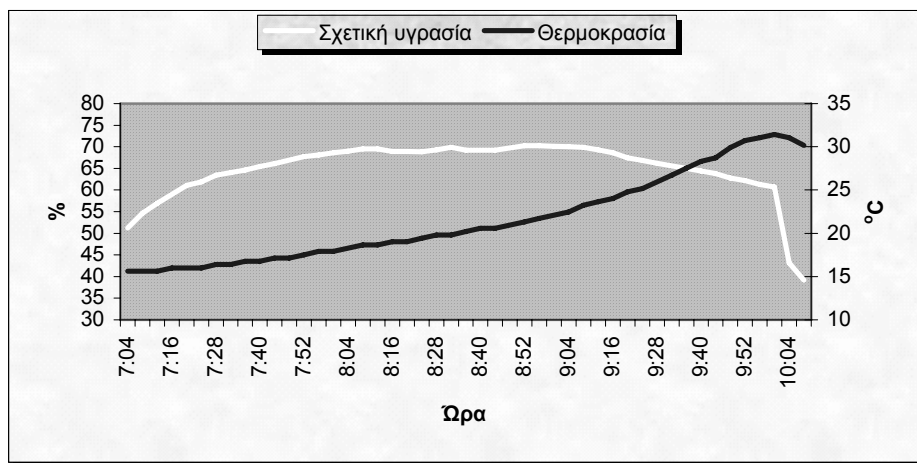
Σχήμα 3. Μεταβολή της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια πρωινού εμπλουτισμού στις 16.6.04. Η διάρκεια του εμπλουτισμού ανήλθε σε 2 ώρες και 24 λεπτά.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3 μετά από συνεχή αερισμό του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας (θερμοκρασίες υψηλότερες από 16°C), η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου πριν από την έναρξη του εμπλουτισμού ήταν 65.2%.

Στις 6:52 η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανήλθε στο σημείο ισοστάθμισης του φωτός, ο αερισμός του θερμοκηπίου σταμάτησε και ξεκίνησε ο εμπλουτισμός του θερμοκηπίου. Στις 9:16, όταν η θερμοκρασία ανήλθε στους 30.2°C και ο εμπλουτισμός σταμάτησε (αερισμός του θερμοκηπίου), η σχετική υγρασία ανήλθε στο 86.5%. Ποσοστά υγρασίας πάνω από 80% επικράτησαν για 40 λεπτά. Η συνολική αύξηση της σχετικής υγρασίας για το χρονικό διάστημα που γινόταν στο θερμοκήπιο εμπλουτισμός ήταν 21.3%.

Οι απογευματινοί εμπλουτισμοί είχαν μια συνήθη διάρκεια από έως 1.5 έως 2 ώρες. Η αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια αυτών των διαστημάτων κυμαινόταν από 7-15%. Καθώς η συγκέντρωση των υδρατμών στο θερμοκήπιο πριν από την έναρξη του εμπλουτισμού ήταν χαμηλή λόγω αερισμού (σχετική υγρασία <55%), η σχετική υγρασία μετά τον εμπλουτισμό δεν ξεπερνούσε το 70%.

Εκτός από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας ένας άλλος παράγοντας που επηρέαζε σε ορισμένες περιπτώσεις τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών ήταν η συμπύκνωση των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης. Η συμπύκνωση αυτή σε συνδυασμό και με την αύξηση της θερμοκρασίας (αύξηση της χωρητικότητας του αέρα σε υδρατμούς) μείωνε τη συγκέντρωση των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Σ' όλες τις περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκε υδροποίηση υδρατμών στην επιφάνεια του καλύμματος κατά τη διάρκεια των εμπλουτισμών η τιμή της σχετικής υγρασίας παρουσίαζε πτώση έπειτα από ανοδική πορεία και η συνολική της μεταβολή κυμάνθηκε από 5 έως 15%. Στο σχήμα 4 δίνεται ένα παράδειγμα κατά τη διάρκεια ενός πρωινού εμπλουτισμού. Ο εμπλουτισμός διήρκεσε 2 ώρες και 56 λεπτά. Η σχετική υγρασία πριν από την έναρξη του εμπλουτισμού ήταν 51.2%.



Σχήμα 4. Μεταβολή της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια πρωινού εμπλουτισμού στις 12.6.04., όπου παρατηρήθηκε συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου

Η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας (70%) εμφανίστηκε 2 ώρες μετά από την έναρξη του εμπλουτισμού, ενώ από τη στιγμή αυτή και μετά μειώθηκε. Η μέγιστη αύξηση της σχετικής υγρασίας ήταν 18.8% και η τελική της τιμή 60.7%. Η συνολική

μεταβολή της σχετικής υγρασίας για όλη την διάρκεια του εμπλουτισμού ανήλθε στο 9.5%.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την έρευνα αυτή είναι ότι η σχετική υγρασία δεν μπορεί να θεωρηθεί περιοριστικός παράγοντας του εμπλουτισμού με CO₂, όταν τα χρονικά διαστήματα εφαρμογής του καθορίζονται από τη θερμοκρασία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μόνες περιπτώσεις που παρατηρήθηκε ότι η σχετική υγρασία ανέρχεται πάνω από τα άριστα για την ανάπτυξη των φυτών επίπεδα του 80% ήταν κατά τη διάρκεια πρωινών εμπλουτισμών με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, με την καλλιέργεια να βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης και τη σχετική υγρασία να κυμαίνεται πριν την έναρξη των εμπλουτισμών σε επίπεδα της τάξεως του 60-65%. Με τις συνθήκες αυτές η σχετική υγρασία ξεπερνούσε το 80%, (80-87%) για ένα χρονικό διάστημα από 0.5 έως 1.5 ώρα. Ωστόσο η αύξηση της σχετικής υγρασίας πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα για ένα τόσο μικρό χρονικό διάστημα δεν επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη της καλλιέργειας και δεν μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ντόγρας Κ. 2001. Καλλιέργεια λαχανικών στο θερμοκήπιο. Τμήμα Εκδόσεων Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο. Θεσσαλονίκη.
2. Υπουργείο Γεωργίας. 2001. Δ/ση Αγροτικής πολιτικής & Τεκμηρίωσης, Τμήμα Εισοδηματικής Πολιτικής, Ακαθάριστη Αξία Γεωργικής Παραγωγής. Αθήνα.
3. Hanan J.J. 1998. Greenhouses. CRC Press, Boca Raton, FL.
4. Enoch, H.Z. 1984. Carbon dioxide uptake efficiency in relation to crop-intercepted solar radiation. Acta Hort. 162:137-147.
5. Hand, D.W. 1983. Pruning CO₂ costs to maximize profits. The Grower(Supplement), 89-93. Feb. 17, 1983.
6. Berry J., Bjorkman O., 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. Anna Rev, Plant Physiol. 31:491–543.
7. Ludwig, L.J. and A.C Withers. 1984. Photosynthetic responses to CO₂ in relation to leaf development in tomato. Adv. in Photosynthetic Res. 4:217-220.
8. Jiao, J., M.J. Tsujita and B. Grodzinski. 1988. Predicting growth of Samantha roses at different light, temperature and CO₂ levels based on net carbon exchange. Acta hort. 230:435-442.

(180)

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Ι. Λυκοσκούφης, Γ. Μαυρογιαννόπουλος

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα, Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών. Ιερά Οδός 75, Βοτανικός, Αθήνα, Τ.Κ. 11855, e-mail: gianluks@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου με τη χρήση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα καθώς και των επιπτώσεων της στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Χρησιμοποιήθηκαν δύο όμοια θερμοκήπια στο ένα από οποία πραγματοποιούνταν αφύγρανση. Η αφύγρανση περιόρισε την συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα και αύξησε κατά 2 °C τη θερμοκρασία του αέρα. Η θερμοκρασία φύλλου των φυτών σε καμία περίπτωση δεν έπεσε κάτω από το σημείο δρόσου του αέρα σε αντίθεση με το θερμοκήπιο μάρτυρα όπου παρατηρήθηκε μικρότερη θερμοκρασία φύλλου από τη θερμοκρασία δρόσου.

THE USE OF HEAT PUMP AIR-AIR FOR REDUCING THE RELATIVE HUMIDITY IN GREENHOUSE

I. Lycoskoufis, G. Mavrogianopoulos

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Laboratory of Agricultural Constructions. 75 Iera Odos str., 11855 Athens, e-mail: gianluks@hotmail.com

ABSTRACT

The purpose of this study was the investigation of the use of heat pump for dehumidifying greenhouse air and also its effects in greenhouse climate. Two similar greenhouses were used, in one of these dehumidification was realized. The dehumidification had as result the restriction of condensation of water vapours on the greenhouse cover and the increase of air temperature at 2 °C. The leaf temperature of plants did not fall under the dew point of air compared to the control greenhouse where was observed lesser leaf temperature than dew point temperature of air.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υγρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Συνήθως έχει τη τάση να είναι υψηλή εξαιτίας του υψηλού ρυθμού εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα πολύ συχνά να παρατηρείται το φαινόμενο της επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών στο χώρο του θερμοκηπίου. Όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία του αέρα, τόσο η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι πλησιέστερη προς τη θερμοκρασία του αέρα σε ένα χώρο και τόσο αυξάνει η πιθανότητα (με μια μικρή μείωση της θερμοκρασίας ή αύξηση της υγρασίας του χώρου) ο αέρας να καταστεί κορεσμένος και να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί που περιέχει. Η συμπύκνωση αρχίζει να γίνεται επάνω σε επιφάνειες του χώρου που αποκτούν χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του αέρα. Για να αποφευχθεί η συμπύκνωση, θα πρέπει η θερμοκρασία του σημείου δρόσου να βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από αυτήν του αέρα και η θερμοκρασία των επιφανειών να είναι μεγαλύτερη από το σημείο δρόσου. Αυτό επιτυγχάνεται ή με μείωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υδρατμούς (με εξαερισμό ή αφύγρανση) είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα ή και με τους δύο τρόπους.

Τα μεταλλικά σκελετικά στοιχεία και το κάλυμμα του θερμοκηπίου είναι οι επιφάνειες που πρωτοεμφανίζεται συνήθως η συμπύκνωση των υδρατμών και ακολουθεί η επιφάνεια των φυτών. Τα μεταλλικά σκελετικά στοιχεία αποκτούν τη νύχτα, ταχύτερα από όλες τις άλλες επιφάνειες, χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του αέρα του θερμοκηπίου, λόγω της άμεσης επαφής τους με τον ψυχρότερο εξωτερικό αέρα και της μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει το υλικό τους. Η πλειοψηφία των ελληνικών θερμοκηπίων με κηπευτικά, ιδιαίτερα στη νότια Ελλάδα, είναι μη θερμαινόμενα και έχουν ως υλικό κάλυψης το πολυαιθυλένιο. Το πολυαιθυλένιο έχει την ιδιότητα να παράγεται σε μεγάλα πλάτη και να χρησιμοποιείται σε φύλλα πολύ μικρού πάχους, δημιουργεί έτσι στεγανά θερμοκήπια, με μικρές ανταλλαγές εσωτερικού-εξωτερικού αέρα. Η αυξημένη στεγανότητα των θερμοκηπίων μπορεί να μειώνει τις απώλειες ενέργειας αλλά ταυτόχρονα προκαλεί αύξηση της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό τους. Αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη θερμοπερατότητα, λόγω του πολύ μικρού πάχους του υλικού, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος, και λόγω της υδρόφοβης επιφάνειας του PE σταγόνες νερού από την οροφή πέφτουν πάνω στα φυτά και το έδαφος. Η επιφάνεια των φυτών ψύχεται επίσης γρήγορα τη νύχτα, επειδή ακτινοβολούν θερμότητα. Σε μερικές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε θερμοκήπια με κάλυψη από πολυαιθυλένιο, όταν επικρατεί καθαρός ουρανός τα φυτά ψύχονται ταχύτερα από τον αέρα και συμπυκνώνονται υδρατμοί πάνω σε αυτά. Βασικό λοιπόν πρόβλημα ιδιαίτερα των μη πλήρως θερμαινόμενων είναι η αδυναμία ρύθμισης της πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους, αφού δεν υπάρχει δυνατότητα αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα με θέρμανση.

Τα παραπάνω δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα στις καλλιέργειες διότι ευνοούν την εμφάνιση και ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών [4]. Οι παραγωγοί, προκειμένου να περιορίσουν και καταπολεμήσουν τις προσβολές, πραγματοποιούν πάρα πολλούς ψεκασμούς με ισχυρά, τις περισσότερες φορές, φυτοφάρμακα. Η αυξημένη χρήση φυτοφαρμάκων συχνά δημιουργεί ανθεκτικότητες των παθογόνων στα χρησιμοποιούμενα γεωργικά φάρμακα και έτσι με τη πάροδο του χρόνου τα καθιστά αναποτελεσματικά. Έτσι, όχι μόνο επιβαρύνεται το περιβάλλον με τοξικές ουσίες, αλλά υπολείμματα αυτών μένουν στους καρπούς και τελικά καταναλώνονται από τους ανθρώπους, ενώ παράλληλα αυξάνουν σημαντικά το κόστος παραγωγής.

Η εύρεση επομένως ενός αποτελεσματικού και οικονομικά εφικτού τρόπου μείωσης της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο είναι αναγκαία. Διάφορα συστήματα

αφύγρανσης έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί [1,2,3]. Το κύριο πρόβλημα αυτών των συστημάτων είναι η έλλειψη συγκράτησης της σχετικής υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Οι Chasserieux (1987) και οι Boulard et al. (1989) χρησιμοποίησαν αντλία θερμότητας μικρής ισχύος σε σχέση με το μέγεθος του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα τη αδυναμία συγκράτησης της σχετικής υγρασίας στο 80%. Οι Campen και Bot (2001) χρησιμοποίησαν έναν σύστημα αντλίας θερμότητας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά και μικρής ικανότητας αφύγρανσης. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και η ανάπτυξη ενός ικανού συστήματος μείωσης της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου και η μελέτη των επιπτώσεων της αφύγρανσης στο περιβάλλον του θερμοκηπίου.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα διενεργήθηκε σε δύο ίδια τοξωτά θερμοκήπια, 63 m² το καθένα, με κάλυμμα πολυαιθυλενίου, του εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, στα οποία αναπτύχθηκε καλλιέργεια αγγουριάς από τον Οκτώβριο του 2006 έως τον Απρίλιο του 2007 (δηλαδή κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους). Τα αποτελέσματα στη παρούσα εργασία αφορούν το χρονικό διάστημα από τις 27 Ιανουαρίου έως 5 Φεβρουαρίου. Τα δύο θερμοκήπια δεν ήταν πλήρως θερμαινόμενα αλλά, για την προστασία των φυτών από τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους δεν αφέθηκε να πέσει κάτω από στους 8 °C, με δύο όμοια συνδεδεμένα αερόθερμα που λειτουργούσαν ταυτόχρονα. Το ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε για να εφαρμοστεί η αφύγρανση του χώρου, ενώ το άλλο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας η υγρασία του οποίου ήταν ανεξέλεκτη.

Για την επίτευξη της μείωσης της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε αντλία θερμότητας αέρα-αέρα (με ονομαστική ισχύ συμπίεστη 1.6 kW). Κατά τη διάρκεια της νύχτας (κλειστά παράθυρα) όταν η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου περνούσε το όριο το 80% άρχιζε η λειτουργία της αντλίας θερμότητας και ο εξατμιστής (38cm*67cm) της αντλίας συμπύκνωνε την υγρασία του αέρα και έτσι μειωνόταν η σχετική υγρασία, ενώ η αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα αποδιδόταν πάλι στο χώρο του θερμοκηπίου μέσω του συμπυκνωτή (44cm*40cm) της αντλίας.

Η θερμοκρασία στο χώρο των δύο θερμοκηπίων και εξωτερικού περιβάλλοντος μετρούνταν με θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (0,5 mm), τα οποία είχαν τοποθετηθεί μέσα σε αεριζόμενο κιτίο στο κέντρο του κάθε θερμοκηπίου και σε ύψος 1,5 m από το έδαφος. Στο ίδιο κιτίο είχαν τοποθετηθεί και αισθητήρια μέτρησης της σχετικής υγρασίας (Thermometriks, NA 1015). Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του καλύμματος τοποθετήθηκαν στην εσωτερική του επιφάνεια και σε ύψος 2 m από το έδαφος θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (0,1 mm), ίδια θερμοζεύγη χρησιμοποιήθηκαν και για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των φύλλων, όπου τοποθετήθηκαν στην κάτω επιφάνεια τους.

Κάθε λεπτό καταγράφονταν οι τιμές της σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων καθώς και αυτές του εξωτερικού αέρα, η θερμοκρασία της εσωτερικής πλευράς του καλύμματος, η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο. Κάθε πρωί καταγραφόταν η ποσότητα των συμπυκνωμένων υδρατμών στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη λήψη τεσσάρων δειγμάτων, δύο σε κάθε πλευρά του θερμοκηπίου, με τη χρησιμοποίηση απορροφητικού χαρτιού συγκεκριμένων διαστάσεων για τη συλλογή του συμπυκνωμένου νερού στο κάλυμμα. Για την αποφυγή της κατακρήμνισης ποσότητας συμπυκνωμένου νερού από τις θέσεις δειγματοληψίας, οι θέσεις δειγματοληψίας προστατεύονταν με οριζόντιους πήχεις σιλικόνης. Στο

θερμοκήπιο που εφαρμόζοταν αφύγρανση καταγράφονταν η ποσότητα του αφαιρούμενου νερού και η διάρκεια λειτουργίας της αφύγρανσης, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας για την αφύγρανση.

Από τις ληφθείσες μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας υπολογίστηκε το σημείο δρόσου του αέρα από την εξίσωση:

$$T_d = \frac{237.3 \left(\frac{\ln(RH/100)}{17.27} + \frac{T}{237.3 + T} \right)}{1 - \left(\frac{\ln(RH/100)}{17.27} + \frac{T}{237.3 + T} \right)}$$

Το νερό που αφαιρείται από το έδαφος του θερμοκηπίου με την εξατμισοδιαπνοή E_{ev} όταν τα παράθυρα είναι κλειστά, συμπυκνώνεται κυρίως στο κάλυμμα του θερμοκηπίου E_c , διαφεύγει στο εξωτερικό περιβάλλον E_{inf} , και αφαιρείται με αφύγρανση από αντλία θερμότητας E_{hp} :

$$E_{ev} = E_c + E_{inf} + E_{hp}$$

Η συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα εξαρτάται από τη διαφορά της συγκέντρωσης των υδρατμών στο αέρα και της συγκέντρωσης των υδρατμών στο κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος:

$$E_{con} = g_{con} (x_a - x_{cl}) \quad (\text{g s}^{-1})$$

όπου x_{cl} είναι η συγκέντρωση των υδρατμών στο κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος και g_{con} ο συντελεστής μεταφοράς μάζας. Γνωρίζοντας την συνολική συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα και τη διαφορά συγκέντρωσης υδρατμών υπολογίστηκε ο μέσος συντελεστής μεταφοράς μάζας υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου.

Από τη ταχύτητα του αέρα έξω από το θερμοκήπιο και τη διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα υπολογίστηκε ο ρυθμός εξαερισμού των θερμοκηπίων, με κλειστά παράθυρα, από τη σχέση (Jolliet, 1994):

$$q = A_f (0,0484w^2 + 0,0256(T_i - T_o)) \quad (\text{m}^3/\text{sec})$$

με

$$A_f = 10^{-3} A_c \quad (\text{m}^2)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια του καλύμματος, w η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα (m/s), T_i η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, T_o η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.

Από το ρυθμό εξαερισμού και τη διαφορά της απόλυτης υγρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα υπολογίστηκαν οι απώλειες υδρατμών των θερμοκηπίων μέσω διαφυγών από την εξίσωση:

$$E_{inf} = q(x_a - x_o) \quad (\text{g s}^{-1})$$

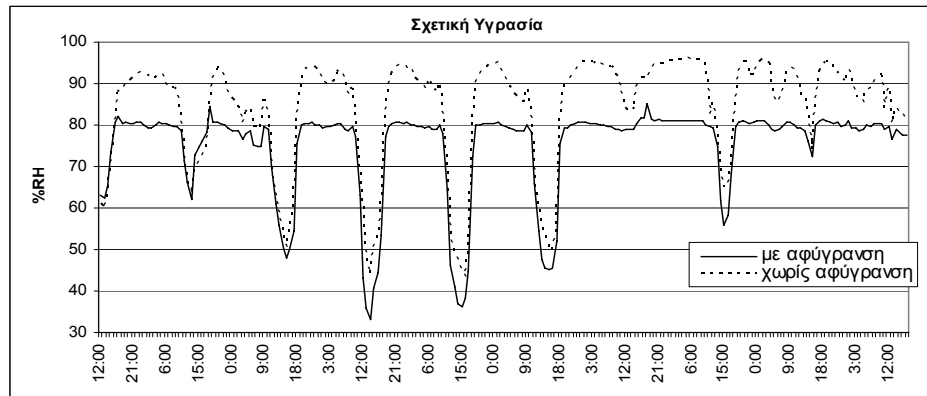
όπου x_a και x_o είναι η απόλυτη υγρασία (g m^{-3}) του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα αντίστοιχα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

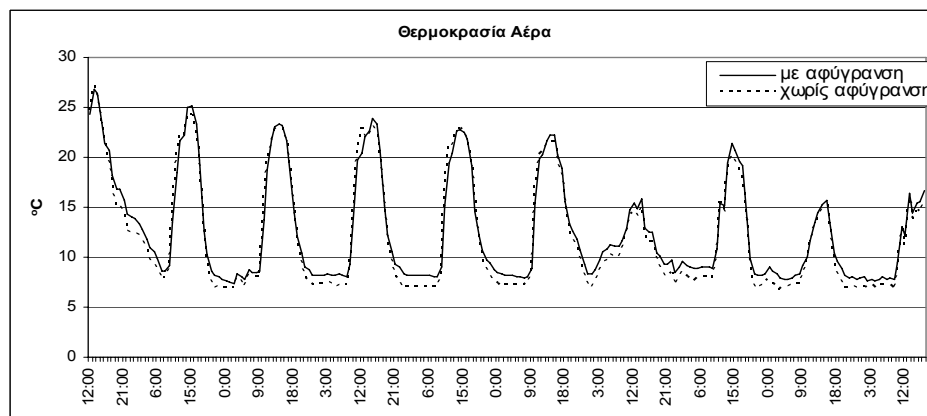
Η χρήση της αντλίας θερμότητας για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου αποδείχθηκε ικανή για τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας στην ανώτερη καθορισμένη τιμή του 80%. Ενώ, στο θερμοκήπιο μάρτυρα έφθανε μέχρι και 96% (Σχήμα 1).

Η διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80% με τη χρήση της αντλίας θερμότητας είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του χώρου του θερμοκηπίου να είναι υψηλότερη μέχρι και κατά 2 °C συγκριτικά με αυτή του θερμοκηπίου χωρίς αφύγρανση, ενώ η μέση

διαφορά θερμοκρασίας των δύο θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν 0,9 °C (Σχήμα 2).



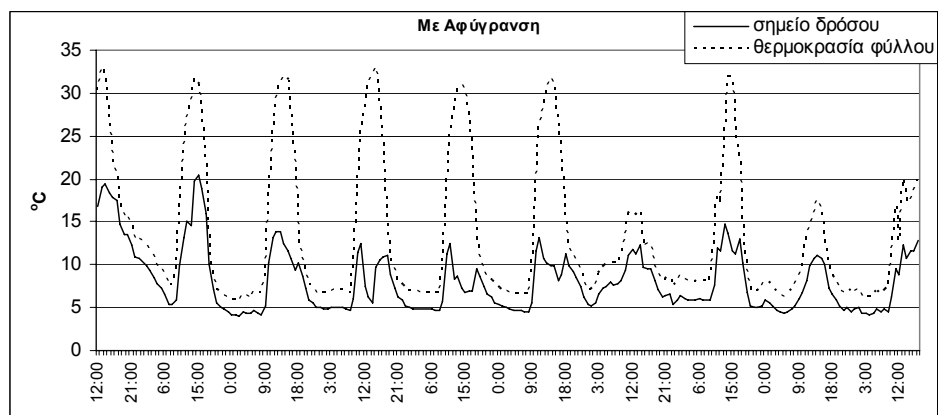
Σχήμα 1. Η σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο, με και χωρίς αφύγρανση.



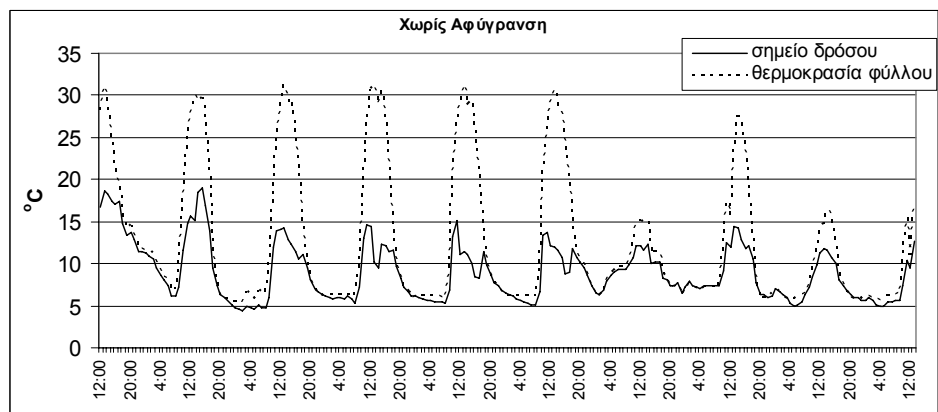
Σχήμα 2. Η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο, με και χωρίς αφύγρανση.

Στο θερμοκήπιο, στο οποίο λειτουργούσε η αφύγρανση, η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών ήταν πάντα μεγαλύτερη από αυτή του σημείου δρόσου του αέρα ($T_l - T_d \geq 1,36^\circ\text{C}$) γεγονός που αποκλείει την συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά (Σχήμα 3).

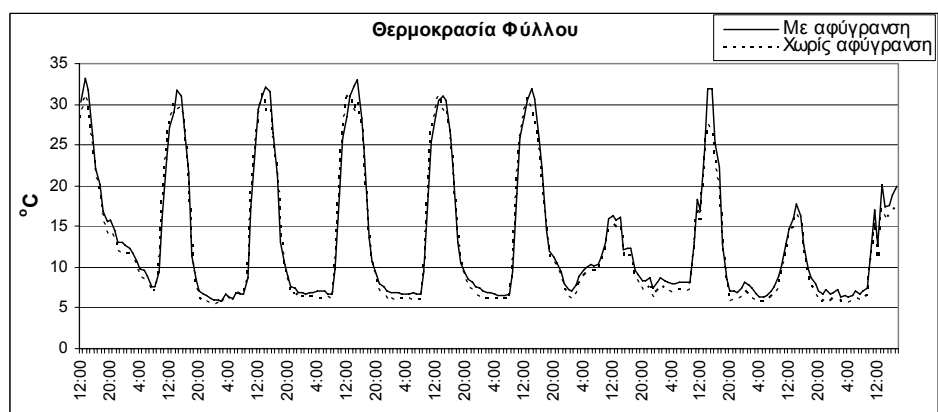
Αντίθετα, στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών τη νύχτα έπεφτε στα επίπεδα του σημείου δρόσου και κάτω από αυτά ($T_l - T_d \leq -0,4^\circ\text{C}$) (Σχήμα 4). Η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα φύλλα των φυτών και στο σημείο δρόσου του αέρα, που παρατηρήθηκε στο θερμοκήπιο με την αφύγρανση συγκριτικά με αυτή στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση οφείλεται τόσο στη μείωση της συγκέντρωσης των υδρατμών του αέρα στο θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας, όσο και στη υψηλότερη θερμοκρασία του χώρου στο θερμοκήπιο που λειτουργούσε η αφύγρανση (Σχήμα 5).



Σχήμα 3. Η πορεία της θερμοκρασίας του φύλλου στο θερμοκήπιο με αφύγρανση συγκριτικά με τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα.



Σχήμα 4. Η πορεία της θερμοκρασίας του φύλλου στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση συγκριτικά με τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα.



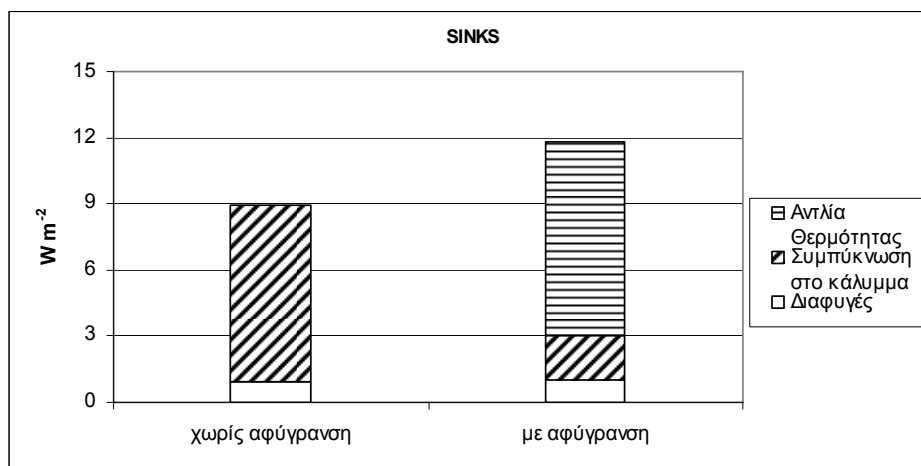
Σχήμα 5. Η πορεία της θερμοκρασίας του φύλλων των φυτών στο θερμοκήπιο με ή χωρίς αφύγρανση.

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς μάζας υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος και των δύο θερμοκηπίων βρέθηκε να είναι ίσος με $2,39 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$, με $r^2 = 0,91$.

$$E_{con} = 2,39 \times 10^{-3} (x_a - x_{cl}) \quad (\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

Η τιμή αυτή του συντελεστή μεταφοράς μάζας υδρατμών βρίσκεται μέσα στη περιοχή που προσδιόρισαν οι Stanghellini et al. (1995), από $1,8 \cdot 10^{-3}$ έως $3,6 \cdot 10^{-3}$.

Στο Σχήμα 6 εμφανίζεται ο μέσος καταμερισμός των απωλειών νερού, για το διάστημα από 27 Ιανουαρίου έως 5 Φεβρουαρίου, με και χωρίς τη λειτουργία της αφύγρανσης με την αντλία θερμότητας.



Σχήμα 6. Η κατανομή των απωλειών υδρατμών του θερμοκηπίου με και χωρίς αφύγρανση.

Η διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80% με την αντλία θερμότητας δημιούργησε ένα μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού το οποίο προκάλεσε μια αύξηση της τάξεως του 28% της εξατμισοδιαπνοής και του αθροίσματος της συμπύκνωσης στον εξατμιστή της αντλίας, της συμπύκνωσης στο κάλυμμα και των διαφυγών στον εξωτερικό χώρο. Από το ραβδόγραμμα (Σχήμα 6) φαίνεται ότι η δράση της αντλίας θερμότητας έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μείωση της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου, η οποία μειώνεται από 90%, των συνολικών απωλειών νερού, στο 17%. Οι απώλειες μέσω διαφυγών με τη χρήση της αντλίας θερμότητας μειώνονται ελαφρώς, προφανώς λόγω της χαμηλότερης της συγκέντρωσης υδρατμών του αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από προηγούμενες εργασίες όπως των Boulard et al. (1989) οι οποίοι βρήκαν σημαντική μείωση της συμπύκνωσης στο κάλυμμα, και υπολόγισαν ότι απαιτούνται $8,70 \text{ W m}^{-2}$ για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Για το χρονικό διάστημα που αναφέρονται τα αποτελέσματα του πειράματος η μέση απαιτούμενη ισχύς μιας αντλίας θερμότητας για τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου είναι $8,78 \text{ W m}^{-2}$ ή $8,78 \text{ kW}$ ανά στρέμμα. Αν θεωρήσουμε ότι η ανάγκη για αφύγρανση εντοπίζεται κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους, για ένα διάστημα 120 ημερών και για 15 ώρες λειτουργίας το 24ωρο, απαιτούνται 15804 kWh (ή 1600 λίτρα πετρελαίου) για κάθε στρέμμα θερμοκηπίου. Με τρέχουσα τιμή του αγροτικού ηλεκτρικού ρεύματος $0,042\text{€/ kWh}$, απαιτείται ένα κόστος της τάξεως των $663,00\text{€}$ περίπου.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το κόστος λειτουργίας της αφύγρανσης με αντλία θερμότητας δεν απαγορευτικό, ειδικά αν υπολογίσουμε τη μείωση του κόστους από τη χρήση των γεωργικών φαρμάκων και την αύξηση των εσόδων από τη καλύτερη απόδοση των φυτών (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Boulard, T., Baille, A., Lagier, J., Mermier, M. and Vanderschmitt E. 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44: 191-204.
2. Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2001. Design of a low-energy dehumidifying system for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1): 65-73.
3. Chasseriaux, G. 1987. Heat pumps for reducing humidity in plastics greenhouses. *Plasticulture*, 73: 29-40.
4. Hand, D.W. 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 229: 143-158.
5. Jolliet, O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57: 23-37.
6. Stanghellini, C. and De Jong, T. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76: 129-148.

(194)

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΕΡΥΨΩΜΕΝΟ ΠΕΡΑΤΟ ΠΕΤΑΣΜΑ

Α. Γιαννούλης, Α. Μυστριώτης και Δ. Μπριασούλης
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών,
Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, e-mail: sosat1012@yahoo.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των φορτίων τα οποία υφίσταται ένα υπερυψωμένο πέτασμα καλυμμένο με δίχτυ, όταν βρίσκεται τοποθετημένο κάθετα στη διεύθυνση που κινείται ο άνεμος. Μετρήσεις που έχουν γίνει πειραματικά για το συγκεκριμένο πέτασμα είτε με κάλυψη διχτυού, είτε με αυτή αδιαπέραστου πλαστικού φύλλου (film) χρησιμοποιούνται για σύγκριση με αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση του μοντέλου. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρείται πως τα πειραματικά και τα υπολογιστικά αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία και για τα δύο υλικά κάλυψης του πετάσματος. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις παρέχουν μια λεπτομερή εικόνα της ροής του ανέμου γύρω από το πέτασμα και επιτρέπουν τον υπολογισμό της μείωσης της ταχύτητας του αέρα στην υπήνεμη πλευρά.

3D NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW AROUND AN ELEVATED PERMEABLE PANEL

A. Giannoulis, A. Mistriotis and D. Briassoulis
Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Engineering,
75 Iera Odos Street, 11855 Athens, Greece, e-mail: sosat1012@yahoo.com

ABSTRACT

The purpose of this paper is the study of the wind loads on an elevated panel covered by net, when located normal to the direction of the wind. Data taken from a full scale experiment for the panel covered with net or a film are used to validate numerical results. for both covering materials, film and nets, numerical and full scale data show good agreement. The numerical simulations provide detailed information with respect to the air flow around the structure and allow for the estimation of the wind field intensity at the leeward side of the panel.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση πλαστικών δίχτων στη γεωργία επεκτείνεται σταθερά τα τελευταία χρόνια. Χρησιμοποιούνται για σκίαση, αντιχαλαζιακή προστασία, ή προστασία κατά εντόμων, καθώς και για τη κατασκευή ανεμοφρακτών. Παρ' όλα αυτά ο σχεδιασμός των κατασκευών που υποστηρίζουν γεωργικά δίχτυα γίνεται με εμπειρικό τρόπο επειδή δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για τα φορτία ανέμου που ασκούνται σε τέτοιες κατασκευές.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει εκτενής μελέτη των μη περατών ανεμοφρακτών που βρίσκονται τοποθετημένοι στο έδαφος [1-7]. Η συνολική πίεση που ασκεί ο άνεμος στα κεντρικά τμήματα ενός ανεμοφράκτη είναι γενικά σταθερή καθ' όλο το μήκος με εξαίρεση τα ελεύθερα άκρα. Για το λόγο αυτό η ροή του ανέμου και τα αντίστοιχα φορτία στα άκρα έχουν μελετηθεί εκτενέστερα. Πολλές έρευνες έχουν γίνει επίσης για τη διαμόρφωση της ροής γύρω από περατά εμπόδια, όπως περατοί ανεμοφράκτες. Κυρίως και πάλι η έρευνα έχει επικεντρωθεί σε ανεμοφράκτες προσαρμοσμένους στο έδαφος. Βασικό αντικείμενο μελέτης στη περίπτωση αυτή είναι η μείωση της ταχύτητας του ανέμου στην υπήνεμη πλευρά.

Μελετήθηκε επίσης στις δύο διαστάσεις το πώς επηρεάζεται ο στρόβιλος που εμφανίζεται στο τμήμα ακριβώς πίσω από τον πορώδη ανεμοφράκτη [8]. Βρέθηκε ότι η αύξηση της περατότητας μειώνει το μέγεθος του στροβίλου. Η περιοχή αποκόλλησης της ροής πάνω από τον ανεμοφράκτη παρατηρήθηκε να είναι ανάλογη του ύψους h του ανεμοφράκτη και ότι η αύξηση της περατότητας επιμηκύνει τη γραμμή αποκόλλησης. Παρατηρήθηκε επίσης πως για περατότητα $(= \text{περατή επιφάνεια ανεμοφράκτη} / \text{συνολική επιφάνεια ανεμοφράκτη})$ κοντά στην τιμή 30-50%, ο στροβιλισμός εξαφανίζεται πλήρως [8,9,11,12].

Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τη μορφή της ροής στην υπήνεμη πλευρά του πορώδους ανεμοφράκτη και κυρίως με το πώς η ύπαρξη του ανεμοφράκτη επηρεάζει διάφορες ποσότητες που σχετίζονται άμεσα με τα τυρβώδη φαινόμενα. Πειραματικά αποτελέσματα δείχναν ότι η ένταση της τυρβώδους ροής μειώνεται καθώς η περατότητα αυξάνεται, ενώ το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και για τις τάσεις Reynolds και την τυρβώδη κινητική ενέργεια [10,11].

Η αλήθεια είναι πως δεν έχουν γίνει εκτενείς μελέτες για τη χρήση δίχτων αλλά ούτε και για υπερυψωμένους ανεμοφράκτες. Η δημοσίευση [13] δίνει μια γενική εικόνα για μια υπερυψωμένη πινακίδα (ανεμοφράκτη). Η μελέτη έγινε σε ανεμοσήραγγα. Παρουσιάζει τις μεταβολές στα επιβαλλόμενα από τον άνεμο φορτία για διάφορες τιμές των διαστάσεων της πινακίδας, της περατότητας αλλά και της διεύθυνσης ανέμου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τρισδιάστατα αριθμητικά αποτελέσματα για ένα υπερυψωμένο πέτασμα καλυμμένο με δίχτυ κάποιας περατότητας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα [14]. Μελετούνται οι πλευρικοί στρόβιλοι και η επίδραση τους στη συνολική πίεση στο πέτασμα καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας εξαιτίας του πετάσματος στην υπήνεμη πλευρά του. Οι ίδιοι υπολογισμοί γίνονται και για αδιαπέραστο πέτασμα ίδιων διαστάσεων έτσι ώστε να γίνει εμφανής η μείωση των φορτίων πάνω στη διάταξη, η εξομάλυνση των πλευρικών στροβίλων αλλά και του πεδίου ροής συνολικά.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1. Αριθμητική προσομοίωση

Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια του πακέτου ANSYS 10.0 και κατ' επέκταση με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που το υπολογιστικό πακέτο αυτό χρησιμοποιεί. Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ανεμοφράκτη τριών διαστάσεων και θεωρήθηκε πως η διάταξη αυτή βρίσκεται σε μια

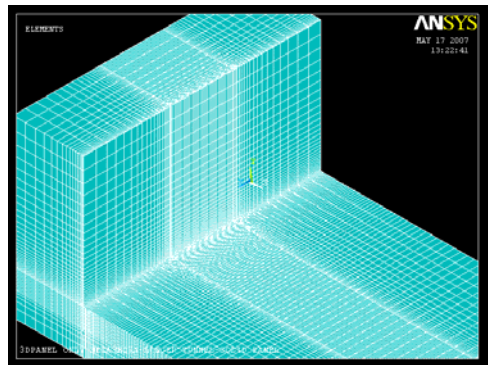
τρισδιάστατη επίσης ορθογώνια ανεμοσήραγγα. Το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η διάταξη στο σύνολό της (ανεμοσήραγγα και ανεμοφράκτης) αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό στοιχείων (elements) για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε, δηλαδή τους δυο περατούς, με κάλυψη διχτυού, ανεμοφράκτες και τον ένα με κάλυψη αδιαπέραστου υλικού (film), ο οποίος φαίνεται στον Πίνακα 1.

Οι διαστάσεις της ανεμοσύραγγας ήταν 42μ, 20μ και 27μ κατά τους x,y και z άξονες αντίστοιχα ή ισοδύναμα 21h, 10h και 13,5h κατά την παραπάνω αντιστοιχία, όπου h θεωρούμε το ύψος του ανεμοφράκτη, $h = 2m$

Τα στοιχεία τα οποία αποτελούσαν το πλέγμα στην αριθμητική προσομοίωση ήταν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (εξάεδρα). Μια απεικόνιση της δομής του πλέγματος της ανεμοσήραγγας κοντά στον ανεμοφράκτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.

Πίνακας 1. Ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος στις διάφορες περιπτώσεις κάλυψης του ανεμοφράκτη.

ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΕΜΟΦΡΑΚΤΗ	FILM	ΠΕΡΑΤΟ ΥΛΙΚΟ (WINDBREAK TAPE)	ΠΕΡΑΤΟ ΥΛΙΚΟ (SCIROCCO MD)
ΑΡΙΘΜΟΣ ELEMENTS	351.216	354.240	495.000



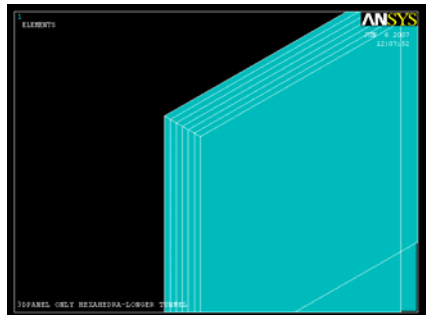
Εικόνα 2. Τομή του πλέγματος της ανεμοσήραγγας κοντά στον ανεμοφράκτη.

Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς τη δομή με την οποία κατασκευάστηκε το πλέγμα. Το τμήμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 είναι μια τομή ακριβώς πάνω από το πάνω άκρο του ανεμοφράκτη. Παρόμοια μορφή έχουμε δώσει στο πλέγμα και από το κάτω άκρο του. Είναι γνωστό πως τα πιο έντονα φαινόμενα, και κατά κύριο λόγο τα τυρβώδη, εμφανίζονται γύρω από τον ανεμοφράκτη, στην υπήνεμη και προσήνεμη πλευρά του. Για το λόγο αυτό, το πλέγμα γίνεται λεπτομερέστερο, δηλαδή αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων καθώς πλησιάζουμε τον ανεμοφράκτη.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εικόνα του πλέγματος πάνω και στο εσωτερικό του πετάσματος σε μεγέθυνση ώστε να καταστούν διακριτά τα στοιχεία κατά μήκος του x άξονα (πάχος ανεμοφράκτη, Εικόνα 2).

Το πλέγμα πάνω στις y-z επιφάνειες του ανεμοφράκτη (η μπροστά και πίσω όψη του ανεμοφράκτη) αποτελείται από ομοιόμορφα κατανομημένα στοιχεία τα οποία έχουν μέγεθος 0,1667μ κατά τις δυο διαστάσεις ή 0,08335h όπου h είναι το ύψος του ανεμοφράκτη. Η σωστή όμως προσομοίωση του περατού υλικού απαιτεί εντονότερη πύκνωση των στοιχείων κατά την διάσταση που αντιπροσωπεύει το πάχος του ανεμοφράκτη. Για τον λόγο αυτό τα στοιχεία κατά την x διάσταση έχουν μέγεθος 0,005μ

ή $0,0025h$. Οι διαστάσεις αυτές του πλέγματος απέφεραν σημαντική συμφωνία των πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων.



Εικόνα 2. Μεγέθυνση του πλέγματος στο εσωτερικού του πορώδους πετάσματος.

2.2. Μοντελοποίηση της τύρβης

Το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική προσομοίωση είναι το κλασσικό μοντέλο $k-\epsilon$. Όπως είναι γνωστό το μοντέλο αυτό υπερεκτιμά σε πολλές περιπτώσεις τις τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης, όπως σε ροές που προσπίπτουν σε εμπόδια και αντιμετωπίζει, συγκεκριμένα, πρόβλημα στα σημεία όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές στην κλίση της ταχύτητας. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το μοντέλο αντιμετωπίζει τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα.

Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά με πολύ θετικά αποτελέσματα ενώ σε σύγκριση με άλλα μοντέλα τύρβης υπερτερεί στην εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Η υιοθέτηση του μοντέλου αυτού απέφερε πολύ καλά αποτελέσματα.

2.3. Οριακές Συνθήκες

Στην είσοδο έχει ορισθεί ένα προφίλ ταχύτητας για το οποίο η ταχύτητα αυξάνεται λογαριθμικά με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Στο κάτω επίπεδο της ανεμοσήραγγας έχουν τεθεί οι συνθήκες μη εισχώρησης και μη ολίσθησης, δηλαδή οι ταχύτητες παράλληλα και κάθετα με το επίπεδο αυτό θεωρούνται ίσες με την τιμή του μηδενός. Στην περίπτωση του μη περατού υλικού ισχύει ακριβώς η παραπάνω συνθήκη ενώ δεν ισχύει στην περίπτωση των διχτυών. Στην έξοδο της ανεμοσήραγγας ισχύει η κλασσική συνθήκη της τιμής της πίεσης ίσης με το μηδέν (εκτόνωση του ρευστού από τη σήραγγα σε μεγαλύτερο χώρο). Τέλος στο άνω επίπεδο της ανεμοσήραγγας η κάθετη σε αυτό ταχύτητα θεωρείται ίση με το μηδέν.

2.4. Προσομοίωση των διχτυών ως περατά υλικά

Η χρήση του κάθε διχτυού προσομοιώθηκε μέσα από το υπολογιστικό πακέτο κάνοντας χρήση της εξίσωσης του Forchheimer [16].

$$\Delta p / \Delta x = \alpha V + \beta V^2$$

Η ανωτέρω σχέση μας δίνει τη μεταβολή της πίεσης ενός ρευστού καθώς διέρχεται από ένα πορώδες υλικό πάχους Δx . Το V αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ρευστού, ενώ οι δύο συντελεστές α , β είναι αυτοί που χαρακτηρίζουν το πορώδες υλικό. Συγκεκριμένα τα α , β δίνονται από τις σχέσεις $\alpha = \mu / K$ και $\beta = C \cdot \rho$, όπου μ είναι το ιξώδες του ρευστού, K η περατότητα του υλικού, ρ η πυκνότητα του ρευστού και C είναι ένας συντελεστής που χαρακτηρίζει έντονα το πορώδες υλικό και ονομάζεται συντελεστής μορφής (form coefficient). Συγκεκριμένα ο συντελεστής β που εμπεριέχει τον

συντελεστή μορφής είναι και αυτός που προσδίδει στην ουσία τα χαρακτηριστικά όσο αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά του πορώδους υλικού. Όπως έχει παρατηρηθεί η περατότητα δεν μπορεί να χαρακτηρίσει πλήρως τη συμπεριφορά ενός πορώδους υλικού (συντελεστής α) εν αντιθέσει με αυτά που αναφέραμε για το συντελεστή μορφής και κατ' επέκταση για το συντελεστή β .

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αξιοπιστία αριθμητικών αποτελεσμάτων

Πρωταρχικός στόχος της εργασίας αυτής ήταν η επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα υπολογιστικά και η έρευνα της αξιοπιστίας των τελευταίων, έτσι ώστε η χρήση τους να μπορεί να αποφέρει περαιτέρω αποτελέσματα. Η επαλήθευσή μας έγκειται σε σύγκριση μεταξύ μέσων τιμών του συντελεστή δύναμης C_f , ο οποίος ως γνωστό ορίζεται ως:

$$C_f = F / (1/2) \cdot \rho \cdot V^2$$

όπου F η δύναμη που ασκείται πάνω στα διάφορα σημεία του ανεμοφράκτη, ρ η πυκνότητα και V η ταχύτητα αναφοράς (ο παρονομαστής είναι κατά τα γνωστά η δυναμική πίεση) που εμείς έχουμε ορίσει σε ύψος 10μ. Τα αποτελέσματα της μέσης τιμής του C_f για τις πειραματικές και υπολογιστικές μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων.

	Υλικό κάλυψης πετάσματος	Περατό- τητα	C_f – Βόρεια	C_f – Νότια	C_f – Υπολογιστικά
1	Scirocco MD	62%	0.6 ± 0.3	0.5 ± 0.4	0.65
2	Windbreak Mono	38%	1.1 ± 0.5	0.9 ± 0.3	1.3
3	Film – 1 st period of measurements	0%	1.3 ± 0.7	1.4 ± 0.4	1.67
4	Film – 2 nd period of measurements	0%	1.6 ± 1.1	1.3 ± 0.6	

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 2 η υπολογιστική προσομοίωση δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά στα αντίστοιχα των πειραμάτων. Οι μέσες τιμές των συντελεστών δύναμης παρουσιάζονται σε συμφωνία και για την περίπτωση των διχτύων αλλά και σε αυτή του μη περατού υλικού. Η μόνη σχετικά αποκλίνουσα τιμή είναι αυτή για το δεύτερο δίχτυ (Windbreak Mono) και συγκεκριμένα για τις μετρήσεις που έγιναν με την διεύθυνση κίνησης του αέρα νότια. Να σημειώσουμε εδώ πως πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για τις δυο πιθανές φορές προσπίπτοντος κάθετου ανέμου, όπως φαίνεται στον πίνακα.

Το συμπέρασμα συνεπώς που μπορεί να εξαχθεί από την παραπάνω σύγκριση, είναι η αξιοπιστία του υπολογιστικού μοντέλου αλλά και πλέον η χρήση του για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για θέματα όπως οι μεταβολές πίεσης και ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά και η μεταβολή των τυρβωδών χαρακτηριστικών

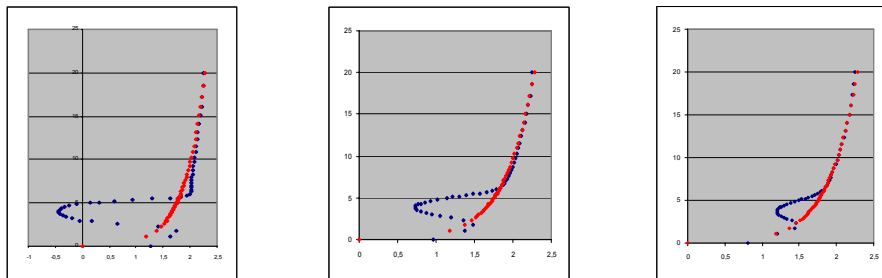
Ένα εξίσου σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 2 είναι η μείωση των μέσων ασκούμενων φορτίων πάνω στον ανεμοφράκτη με τη χρήση διχτύων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά αλλά και τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια θα αναλυθεί το πώς η χρήση των διχτύων αποσβένει τους στροβίλους στα ελεύθερα άκρα του ανεμοφράκτη.

3.2. Χρήση του υπολογιστικού μοντέλου για τον υπολογισμό του προφίλ της ταχύτητας και της κινητικής ενέργειας της τύρβης

Πέραν των συντελεστών ανεμοπίεσης, η αριθμητική προσομοίωση παρέχει πλήρη εικόνα της ροής γύρω από το πέτασμα. Έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστεί το προφίλ της ταχύτητας πίσω από το πέτασμα (φαινόμενο ανεμοφράκτη). Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία όπου εμφανίζονται αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση ενός ανεμοφράκτη στο έδαφος περατού είτε μη περατού. Επίσης είναι βασικό να σημειωθεί πως στην αναφερόμενη βιβλιογραφία δεν έχει καταγραφεί η χρήση δίχτων αλλά μόνο περατών ανεμοφρακτών των οποίων η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από την οπτική περατότητα, ποσότητα που αντιστοιχεί στο λόγο της οπτικά ανοικτής επιφάνειας προς την οπτικά ολική επιφάνεια του ανεμοφράκτη. Αναφέρθηκε προηγουμένως βέβαια ότι αυτό δεν είναι έγκυρο και πως η συμπεριφορά ενός πορώδους υλικού χαρακτηρίζεται από το συντελεστή β της εξίσωσης του Forchheimer

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου δημιουργήθηκε το προφίλ της ταχύτητας σε ένα επίπεδο $x-y$ το οποίο διέρχεται από το κέντρο του ανεμοφράκτη, δηλαδή για σταθερό $z=13,5 = 7,25 h$, στην υπήνεμη πλευρά του ανεμοφράκτη και κοντά σε αυτόν, συγκεκριμένα σε θέση $x = 0,5h$, όπου h το ύψος του ανεμοφράκτη όπως ορίστηκε προηγουμένως, ενώ ο ανεμοφράκτης είναι στη θέση $x=0$.

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει το προφίλ της συνιστώσας της ταχύτητας κατά τον x -άξονα. Είναι εμφανής η εξομάλυνση στη ροή η οποία προκύπτει και στις δυο περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται ως κάλυψη του ανεμοφράκτη τα δυο δίχτυα. Σε κάθε παράσταση υπάρχει και το συγκριτικό διάγραμμα του προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο της ανεμοσήραγγας. Είναι εμφανές πως η αδιαπέραστη κάλυψη προκαλεί εντονότερη απόκλιση από το αρχικό προφίλ της ταχύτητας, γεγονός που δεν υφίσταται στα δυο επόμενα διαγράμματα. Να σημειωθεί ότι μεγαλύτερη εξομάλυνση προκαλεί το δίχτυ του τελευταίου διαγράμματος το οποίο εμφανίζει και την μεγαλύτερη περατότητα.

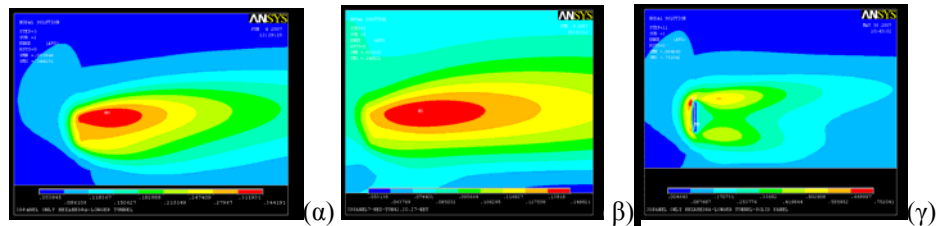


Εικόνα 3. Το προφίλ της συνιστώσας της ταχύτητας κατά τον άξονα x (διεύθυνση ροής του ανέμου) σε επίπεδο $x-y$ και σε θέση $x=0,5h$ στην υπήνεμη πλευρά του ανεμοφράκτη για αδιαπέραστη και τις δυο περατές καλύψεις (αδιαπέραστο- WindbreakMono- Scirocco MD).

Αξίζει επίσης να αναφερθεί η ύπαρξη αρνητικών ταχυτήτων στο προφίλ του αδιαπέραστου καλύμματος. Είναι λοιπόν προφανής η δημιουργία στροβιλισμού στο υπήνεμο τμήμα αυτού του ανεμοφράκτη. Η απουσία των αρνητικών ταχυτήτων από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν με κάλυψη του ανεμοφράκτη από δίχτυα, εκφράζει την απόσβεση των στροβίλων. Τα δυο δίχτυα έχουν υψηλή περατότητα και οι στροβίλοι έχουν εξαφανιστεί, πράγμα το οποίο αναμενόταν και από στοιχεία της βιβλιογραφίας

[8,11,12] που αναφέρουν ύπαρξη στροβίλων για περατότητες το πολύ κοντά σε τιμές του 30%.

Σημαντική ένδειξη σαφώς της παρουσίας ομαλής ροής δεν θα μπορούσε να είναι άλλη από την απουσία έντονων τυρβωδών φαινομένων. Στη συνέχεια ακολουθούν ισο-καμπύλες της κινητικής ενέργειας της τύρβης κοντά στον ανεμοφράκτη και για τομή στο επίπεδο $x-z$ δημιουργώντας ένα $x-y$ επίπεδο που διέρχεται από το μέσο του ανεμοφράκτη. (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Ισο-καμπύλες της κινητικής ενέργειας της τύρβης κοντά στον ανεμοφράκτη για τις τρεις καλύψεις (επίπεδο $x-y$, (α) Windbreak Mono, (β) Scirocco MD, (γ) Film)

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται η μορφή της κινητικής ενέργειας της τύρβης. Στις δυο περιπτώσεις της κάλυψης με δίχτυα είναι εμφανής η πιο ομαλή μορφή των διαγραμμάτων πράγμα το οποίο δεν συναντάται στην περίπτωση του film. Εξάλλου στο διάγραμμα της αδιαπέραστης κάλυψης οι ισο-καμπύλες δίνουν και την εμφάνιση των δυο στροβίλων στα άνω και κάτω άκρα του ανεμοφράκτη στη γειτονιά της υπήνεμης πλευράς του. Να σημειωθεί πως η διαβάθμιση δεν θα πρέπει να ξεγελά μιας και δημιουργείται βάσει της μέγιστης τιμής της κινητικής ενέργειας της τύρβης. Στο διάγραμμα με την αδιαπέραστη κάλυψη η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στο 0,75 και εντοπίζεται στις άκρες του ανεμοφράκτη στην προσήνεμη πλευρά όπου εμφανίζονται οι μέγιστες μεταβολές στην κλίση της ταχύτητας. Στις περιοχές όπου εμφανίζονται οι στροβιλισμοί οι τιμές είναι μεταξύ 0,33-0,75. Στα αλλά δυο διαγράμματα οι μέγιστες τιμές, οι οποίες εμφανίζονται σε όλο το πεδίο πίσω από τον ανεμοφράκτη, αγγίζουν τα 0,14 για το δίχτυ Scirocco MD και 0,34 για το Windbreak Mono.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε ένα υπερυψωμένο ανεμοφράκτη πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις της μέσης τιμής του συντελεστή δύναμης C_f και συγκρίθηκαν με υπολογιστική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του πακέτου *ANSYS 10.0*. Οι τιμές βρέθηκαν σε αρκετά καλή συμφωνία, ενώ οι δυο μορφές μετρήσεων αποδείξανε την μείωση των φορτίων πάνω σε ένα ανεμοφράκτη εάν η κάλυψη αλλάξει από αδιαπέραστη σε περατή με τη χρήση δύο δίχτυων.

Η χρήση των δίχτυων επίσης βοήθησε στην εξομάλυνση της ροής στην υπήνεμη πλευρά του ανεμοφράκτη, όπως παρουσιάζεται από διαγράμματα προφίλ ταχύτητας, αλλά και στην απόσβεση των στροβίλων που εμφανίζονται στα ελεύθερα άκρα του ανεμοφράκτη. Ούτως ή άλλως, η απόσβεση των στροβίλων, εξαιτίας της χρήσης δίχτυων, είναι σημαντική ένδειξη εξομάλυνσης της ροής.

Τέλος, ισο-καμπύλες της κινητικής ενέργειας της τύρβης, μας έδωσαν μια άποψη για την ένταση των τυρβωδών φαινομένων στην περιοχή κοντά στον ανεμοφράκτη. Όπως περιμέναμε, συναντήσαμε πιο ομαλή μορφή ροής στην κάλυψη με δίχτυα, ενώ υψηλές τιμές κινητικής ενέργειας της τύρβης εμφανίστηκαν για αδιαπέραστη κάλυψη (film).

***Η εργασία αυτή υποστηρίχτηκε από το πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ2003, αρ. Έργου 660, της ΓΓΕΤ.**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C.W. Letchford, J.D. Holmes. 1994. Wind loads on free-standing walls in turbulent boundary layer, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 51 : 1-27
2. A.P.Robertson, R.P. Hoxey, P.J. Richards. 1995. Design code, full-scale and numerical data for wind loads on free-standing walls, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 57 :203-214
3. A.P.Robertson, R.P. Hoxey, J.L. Short, W.A. Ferguson, S.Osmond. 1996. Full-scale testing to determine the wind loads on free-standing walls, , J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 60 : 123-137
4. A.P.Robertson, R.P. Hoxey, P.J. Richards, W.A Ferguson. 1997. Full-scale measurements and computational predictions of wind loads on free-standing-walls, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 67&68 : 639-646
5. A.P.Robertson, R.P. Hoxey, J.L. Short, W.A. Ferguson, P.A. Blackomore. 1997. Wind loads on boundary walls : Full-scale studies, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 69-71 : 451-459
6. A.P.Robertson, R.P. Hoxey, J.L. Short, W.A. Ferguson, P.A. Blackomore. 1998 Prediction of structural loads from fluctuating wind pressures: Validation from full-scale force and pressure measurements, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 74-76 : 631-640
7. C.W. Letchford, A.P. Robertson. 1999. Mean wind loading at the leading ends of free-standing walls, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 79 : 123-134
8. M.D.A.E.S. Perera. 1981. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 8 : 93-104
9. E.F. Bradley, P.J. Mulhearn. 1983. Development of velocity and shear stress distributions in the wake of a porous shelter fence, , J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 15: 145-156
10. K.G. Ranga Raju, R.J. Garde, S.K. Singh, Nawab Singh. 1988. Experimental study on characteristics of flow past porous fences, , J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 29 : 155-163
11. Sang-Joon Lee, Hyoung- Bum Kim. 1999. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 80 : 311-326
12. A.R. Packwood. 2000. Flow through porous fences in thick boundary layers : Comparisons between laboratory and numerical experiments, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 88 : 75-90
13. C.W. Letchford. 2001. Wind loads on rectangular signboards and hoardings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 89 : 135-151
14. Briassoulis D., and Mistriotis A., (2006): “*Full-scale measurement of the aerodynamic coefficients for, agricultural nets*”, Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineers, AgEng, AgEng2006 / XVI CIGR World Congress, Bonn, Germany, September 3-7, 2006, Conf page 1958/0831, Archive no 44011958082.
15. Lage, J.L., (1998): The Fundamental Theory of Flow through Permeable Media from Darcy to Turbulence, p 1-31, in “Transport Phenomena in Porous Media” edited by D.B. Ingham & I. Pop, Pergamon Press (1998), Oxford.

(197)

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ

Ι. Α. Τσιρογιάννης¹, Ν. Κατσούλας², Κ. Κίττας² και Δ. Σάββας³

¹ ΤΕΙ Ηπείρου, Τμ. Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου. Τ.Θ. 110, 47100 Άρτα.
itsirog@teiep.gr

² Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας, Φυτ. Παρ/γής και Αγρ. Περιβάλλοντος, Εργ. Γεωργ.
Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, 38446. ckittas@agr.uth.gr

³ ΓΠΑ, Τμ. Φυτ. Παρ/γής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα. dsavvas@aia.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται σύγκριση πειραματικών μετρήσεων εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας πιπεριάς με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσεγγίσεις FAO Penman–Monteith και Stanghellini. Τα αποτελέσματα κρίνονται πρακτικά εφαρμόσιμα άλλα οι συντελεστές συσχέτισης με τα πειραματικά δεδομένα είναι μέτριοι, γεγονός που πιστοποιεί την ανάγκη ρύθμισης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για προσαρμογή τους σε μεσογειακές συνθήκες με ιδιαίτερη έμφαση στην εκτίμηση των συντελεστών αεροδυναμικής και στοματικής αντίστασης.

COMPARISON OF WATER NEEDS CALCULATION METHODS FOR GREENHOUSE PEPPER CULTIVATION

I. L. Tsirogiannis¹, N. Katsoulas², C. Kittas² and D. Savvas³

¹ TEI of Epirus, Dept. FLA. P.O. Box 110, 47100 Arta. itsirog@teiep.gr

² University of Thessaly, School of Agr. Sciences, Dept. of Agriculture Crop Production
and Rural Environment, N. Ionia, Magnesia 38446. ckittas@agr.uth.gr

³ Agricultural Univ. of Athens, Dept. of Crop Prod., Iera Odos 75, 11855 Athens,
dsavvas@aia.gr

ABSTRACT

In the present study, experimental evapotranspiration data originating from a greenhouse pepper cultivation were compared with the corresponding values predicted by two alternative models, specifically the FAO Penman–Monteith model and that proposed by Stanghellini. The results are considered applicable to cultivation practice but the coefficients of determination were mediocre for both methods which stresses the necessity for adjustments in order to improve their efficiency for the case of Mediterranean greenhouse conditions with emphasis to the assessment of aerodynamic and canopy resistances.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημερινή πρακτική, όσον αφορά τη διαχείριση της άρδευσης στις θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις της χώρας, μας στηρίζεται κατά κύριο λόγο στην εμπειρία του παραγωγού και στις πρακτικές που έχουν επικρατήσει σε κάθε περιοχή για τις διάφορες καλλιέργειες. Παρόλα αυτά, για τον προγραμματισμό της άρδευσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι οι οποίες βασίζονται σε πληροφορίες όπως: η υγρασία στο ριζόστρωμα, το δυναμικό του νερού στα φύλλα, παράγοντες του μικροκλίματος σε συνδυασμό με παραμέτρους της καλλιέργειας, θερμοκρασία φύλλων κ.λ.π. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην περίπτωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, αισθητήρες ελέγχου κλιματικών παραμέτρων τοποθετημένοι μέσα (θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση CO₂), ή έξω από το θερμοκήπιο (ολική ηλιακή ακτινοβολία) είναι γενικά διαθέσιμοι και παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο στον έλεγχο του μικροκλίματος αλλά και στον προγραμματισμό της άρδευσης. Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα συνίσταται στην εκτίμηση της διαπνοής της καλλιέργειας με βάση την ηλιακή ακτινοβολία. Γενικότερα παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των εκτιμήσεων της υδατοκατανάλωσης που παρέχουν οι διάφορες προσεγγίσεις, τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό η σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής στο εσωτερικό του θερμοκηπίου απασχολεί αρκετούς ερευνητές [1, 2, 3].

Στην παρούσα εργασία γίνεται σύγκριση πειραματικών μετρήσεων εξατμισοδιαπνοής υδροπονικής καλλιέργειας πιπεριάς (*Capsicum annuum* L.) σε θερμοκήπιο με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέκυψαν από δύο υπολογιστικές προσεγγίσεις.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Οι μετρήσεις έγιναν στο πλαίσιο ενός γενικότερου πειράματος που αφορούσε τη μελέτη της θρέψης αλλά και του κλίματος υδροπονικής καλλιέργειας πιπεριάς (*Capsicum annuum* L. cv. Calyx F1) το οποίο διεξήχθη την περίοδο από Ιούλιο έως Νοέμβριο 2005 στο γυάλινο θερμοκήπιο του τμήματος Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου στους Κωστακισούς Άρτας (συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87, X: 234712,17 m, Y: 4333915,20 m, υψόμετρο 5 m).

Το θερμοκήπιο είναι αμφικλινές, διπλό, με προσανατολισμό κορφιά Α-Δ. Η κάλυψη είναι από υαλοπίνακες μαρτελέ, πάχους 4 mm. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου είναι: ύψος υδρορροής = 3,15 m, ύψος κορφιά = 4,40 m, πλάτος κόλπου = 6,50 m, μήκος = 46 m, εμβαδόν = 600 m², όγκος = 2270 m³. Το πάτωμα είναι στρωμένο με σκυρόδεμα.

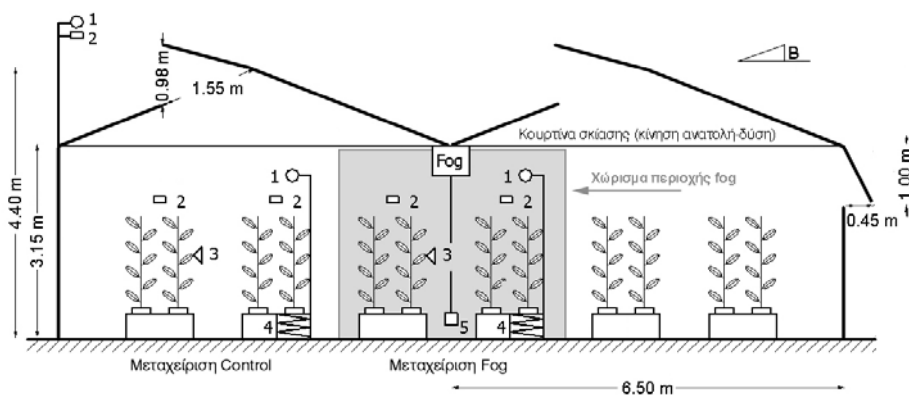
Ο αερισμός γίνεται από δύο συνεχή ανοίγματα στην οροφή (στη βόρεια πλευρά κάθε κόλπου) και ένα πλαϊνό άνοιγμα στην νότια πλευρά, τα οποία συνδέονται με άρθρωση στο πάνω μέρος τους. Τα ανοίγματα έχουν μήκος 45,90m, αυτά της οροφής έχουν πλάτος 1,55m και μέγιστο εμβαδόν 43m² ενώ το πλαϊνό έχει ύψος 1,00m και μέγιστη επιφάνεια 23m². Εκτός του φυσικού αερισμού για τον έλεγχο του κλίματος χρησιμοποιούνται συνολικά 6 μονάδες υδρονέφωσης ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της μεσαίας υδρορροής του θερμοκηπίου (ML Princess 2, ML System, με 8 ακροφύσια ανά μονάδα και ανεμιστήρα κατακόρυφης κίνησης αέρα, πίεση λειτουργίας 40bar και παροχή 36 L h⁻¹ για την κάθε μονάδα) καθώς και κουρτίνα σκίασης (επιτυγχάνει σκίαση της τάξης του 50% σύμφωνα με τον κατασκευαστή). Ακόμη

υπάρχει σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις ζεστού νερού περιμετρικά και εντός του θερμοκηπίου.

Η θρέψη της καλλιέργειας γίνεται με κλειστό σύστημα υδροπονίας και η άρδευση με σύστημα στάγδην. Η καλλιέργεια γίνεται σε πάγκους ύψους 0,85 m, σε κάθε πάγκο υπάρχουν 2 κανάλια μήκους 5 m και πλάτους 0,25 m. Συνολικά είναι εγκατεστημένοι 36 πάγκοι. Όλα τα συστήματα (κλίμα, θρέψη και άρδευση) ελέγχονται από ειδική μηχανή και λογισμικό της Autonet.

Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο τμήμα του θερμοκηπίου (1/3 της έκτασης) που αποτελείται από 12 πάγκους. Σε κάθε πάγκο φυτεύτηκαν 15 φυτά / κανάλι σε γλάστρες των 4 L με υπόστρωμα ελαφρόπετρας στο ένα κανάλι και σάκους Fytocell, μήκους 1 m στο άλλο. Τα κανάλια ήταν σκεπασμένα με αδιαφανές πλαστικό φύλλο ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η εξάτμιση από αυτά. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,60 φυτά m⁻². Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και οι θέσεις των οργάνων μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων.

Τέσσερις πάγκοι πάνω από τους οποίους ήταν δύο μονάδες υδρονέφωσης απομονώθηκαν με πλαστικό φύλλο που έφτανε έως το ύψος της υδρορροής και αποτελούσαν το τμήμα Fog. Άλλοι τέσσερις πάγκοι αποτελούσαν το τμήμα Control. Οι κλιματικές ρυθμίσεις κατά την περίοδο του πειράματος είχαν ως εξής: συνεχής λειτουργία της υδρονέφωσης από 10:00 έως 18:00 με στόχο την διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80%, διατήρηση των ανοιγμάτων ανοικτών όσο η θερμοκρασία στην περιοχή Fog ήταν μεγαλύτερη των 26°C, διατήρηση της κουρτίνας ανοικτής με κάλυψη 80% της επιφάνειας του θερμοκηπίου ώστε να μην εμποδίζεται ο φυσικός αερισμός και διαχείριση άρδευσης με βάση το άθροισμα της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας με ποτίσματα ανά 350 Wh κατά μέσο όρο και στόχο απορροής 35%.



Σχήμα 1. Τομή του θερμοκηπίου με την πειραματική εγκατάσταση και τα όργανα μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων: 1-πυρανόμετρο, 2-αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασία αέρα, 3-θερμοζεύγη για μέτρηση θερμοκρασίας φύλλου, 4- λυσιμετρικοί ζυγοί και 5-παροχόμετρο.

2.2. Μετρήσεις πεδίου και υπολογισμοί

Σκοπός της εργασίας είναι να γίνει υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας με δύο κοινά αποδεκτά μοντέλα: τη μέθοδο FAO Penman-Monteith (FAO P-M, Σχέση 1) [4] σε συνδυασμό με κατάλληλους φυτικούς συντελεστές που αφορούν την ειδική περίπτωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών και τη μέθοδο Stanghellini (Σχέση 2) [1, 2, 3, 5] που τροποποιεί την σχέση Penman-Monteith με σκοπό τον άμεσο υπολογισμό των υδατικών αναγκών των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Οι εκτιμήσεις των μοντέλων συγκρίνονται με άμεσες μετρήσεις της εξατμισοδιαπνοής. Στη Σχέση 2

έχουν γίνει μικρές προσαρμογές σε σχέση με τις πρωτότυπες εκφράσεις ώστε να ταιριάζουν τα σύμβολα και οι μονάδες με αυτές που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο FAO P-M [4]:

$$ET_c = K_c \times ET_o = K_c \times \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

$$ET_c = 2LAI \frac{1}{\lambda} \times \left(\frac{\Delta(R_{nSt} - G) + 86400 \frac{(e_s - e_a)\rho C_p}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \quad (2)$$

$$R_{nSt} = 0,07R_{ns} - \frac{252\rho C_p(T - T_c)}{r_R}, \quad r_R = \frac{\rho C_p}{4\sigma(T + 273,15)^3}$$

όπου, ET_c : δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm day^{-1}), K_c : φυτικός συντελεστής (αδιάστατος), ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για κανονικές συνθήκες (mm day^{-1}), R_n : καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας (R_{nSt} : υπολογισμένη σύμφωνα με το μοντέλο Stanghellini [5]) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), R_{ns} : ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος εντός του θερμοκηπίου ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G : ροή θερμότητας προς το έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T : μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2 m ($^{\circ}\text{C}$), T_c : μέση ημερήσια θερμοκρασία φύλλου ($^{\circ}\text{C}$), u_2 : ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m (m s^{-1}), e_s : πίεση υδρατμών στο κορεσμό (για θερμοκρασία αέρα) (kPa), e_a : πίεση υδρατμών (για θερμοκρασία αέρα) (kPa), Δ : κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), LAI : δείκτης φυλλικής επιφάνειας (επιφάνεια φύλλων ανά επιφάνεια εδάφους ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), ρ : πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (MJ kg^{-1}), C_p : ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$), σ : σταθερά Stefan-Boltzman ($\text{MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ day}^{-1}$), r_a : αεροδυναμική αντίσταση της καλλιέργειας (μέση τιμή ημέρας) (s m^{-1}), r_s : στοματική αντίσταση της καλλιέργειας (μέση τιμή ημέρας) (s m^{-1}), r_R : αντίσταση ακτινοβολίας (day m^{-1}).

Σε κάθε τμήμα καταγράφονταν οι ακόλουθες κλιματικές παράμετροι:

- θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και σχετική υγρασία (%) αέρα, μέσω 8 αισθητήρων, ένας για κάθε πάγκο (model H08-032-08, HOBO instruments, MA),
- ολική ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό (W m^{-2}), (πυρανόμετρα model SKS 1110, Skye instruments, UK),
- θερμοκρασία φύλλων ($^{\circ}\text{C}$), με θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (type T, διάμετρος αισθητήρα 1 mm, Omega Engineering, Manchester, U.K.) τα οποία ήταν στερεωμένα στην κάτω επιφάνεια των φύλλων,
- διαπνοή, μέσω δύο λυσιμετρικών ζυγών (model 60000 G SCS, Presica, Switzerland), καθένας από τους οποίους έφερε 3 φυτά σε ειδική κατασκευή.

Η απώλεια βάρους που κατέγραφαν οι ζυγοί θεωρήθηκε ίση με τη απώλεια νερού μέσω διαπνοής από τα φυτά. Παράλληλα γινόταν καταγραφή του όγκου νερού (l) που εκνεφωνόταν από τις δύο μονάδες υδρονέφωσης (παροχόμετρο model DN 25, Actaris, France), της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, καθώς και της σχετικής υγρασίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου. Όλες οι μετρήσεις (εκτός από αυτές των HOBO) συλλέγονταν σε data logger (model DL3000, Delta-T devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις γίνονταν ανά 30 s και καταγράφονταν οι μέσοι όροι δεκαλέπτου.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας εκτιμήθηκε μέσω καταστροφικών μετρήσεων ολόκληρων φυτών, των οποίων τα φύλλα σαρώθηκαν σε scanner. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν τρεις φορές: στις 9 Αυγούστου, στις 26 Σεπτεμβρίου και στις 22 Νοεμβρίου και η αντίστοιχη τιμή του LAI βρέθηκε ίση με 1,90, 4,30 και 3,20 για το τμήμα με σύστημα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη (Fog) και 2,10, 3,40 και 2,20 για το τμήμα Control.

Όσον αφορά την ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο των φυτών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, επειδή δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις επιλέχθηκε η τιμή $0,5 \text{ m s}^{-1}$ μετά από αναζήτηση στη σχετική βιβλιογραφία (για παρόμοιες κατασκευές και καλλιέργειες βρέθηκαν: $0,10\text{-}0,50 \text{ m s}^{-1}$ [6], $0,30 \text{ m s}^{-1}$ [7], $0,12\text{-}0,18 \text{ m s}^{-1}$ [8], όμως η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m πρέπει να είναι μεγαλύτερη η ίση των $0,50 \text{ m s}^{-1}$ όταν χρησιμοποιείται στην εξίσωση υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής [4] ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις της αστάθειας του οριακού στρώματος και η άνωση του αέρα όσον αφορά την υποβοήθηση της ανταλλαγής υδρατμών στην επιφάνεια όταν υπάρχει νηνεμία. Θέτοντας τον περιορισμό αυτό ως προς την ταχύτητα ανέμου για την εξίσωση της ET βελτιώνεται η ακρίβεια εκτίμησης υπό συνθήκες πολύ χαμηλής ταχύτητας ανέμου (συνηθισμένη κατάσταση στο θερμοκήπιο).

Η ροή θερμότητας προς το έδαφος (G) μπορεί -σε περιπτώσεις που η περίοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής είναι ίση ή μεγαλύτερη της ημέρας- να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέα [1, 4].

Σχετικά με τη λευκαύγεια (α , albedo), το συντελεστή αντίστασης επιφάνειας και τον αεροδυναμικό συντελεστή αντίστασης στη μεταφορά υδρατμών που είναι απαραίτητα δεδομένα για τον άμεσο υπολογισμό με βάση το μοντέλο Stanghellini [1, 5] αναζητήθηκαν δεδομένα στη βιβλιογραφία και έγιναν έμμεσοι υπολογισμοί. Για τη λευκαύγεια η μέση ημερήσια τιμή για τη θερινή περίοδο θεωρήθηκε ίση με 0,25 για καλλιέργεια πιπεριάς σε θερμοκήπιο (τμήμα Control) [9, 10, 11], ενώ για το τμήμα Fog, λόγω του ότι για μεγάλο διάστημα της ημέρας τα φύλλα ήταν βρεγμένα, επιλέχθηκε τιμή ίση με 0,15 [12]. Για τη στοματική και την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, δεν βρέθηκαν αναφορές στη βιβλιογραφία για καλλιέργεια πιπεριάς. Γενικά, υπάρχει μεγάλη έλλειψη καλά τεκμηριωμένης πληροφορίας σχετικά με τους συντελεστές αυτούς [4]. Έτσι, έγινε εκτίμησή τους από βιβλιογραφικές πηγές [13, 14] και από έμμεσο υπολογισμό τους [8, 15]. Οι μέσες ημερήσιες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $r_a=100$ και 150 s m^{-1} για τα τμήματα Control και Fog αντίστοιχα και $r_c=200 \text{ s m}^{-1}$ και για τα δύο τμήματα.

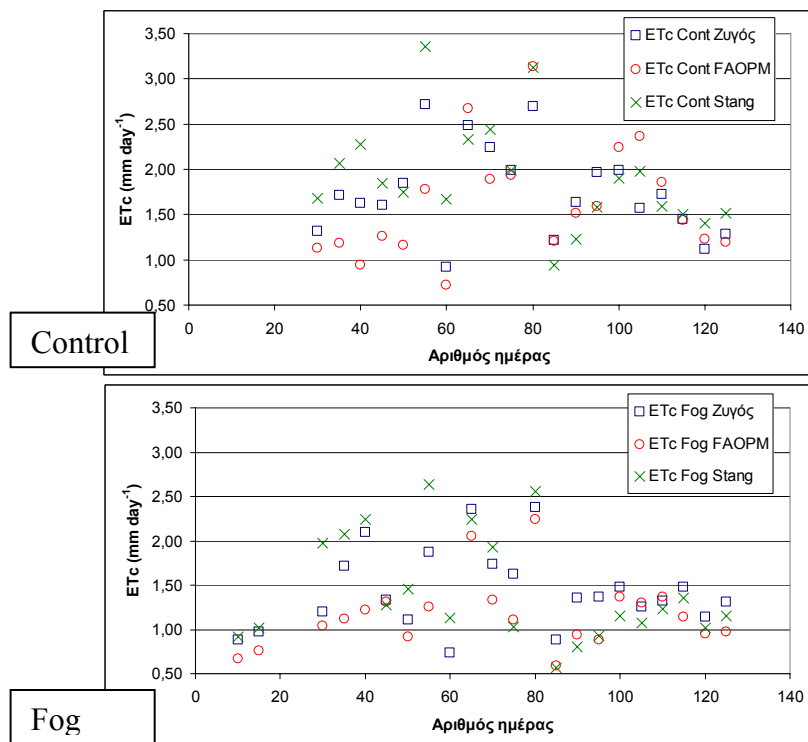
Τέλος, όσον αφορά τους φυτικούς συντελεστές που απαιτούνται για τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο FAO P-M [4] χρησιμοποιήθηκαν αυτοί που αναφέρονται από τους Orgaz et al. [16] για πιπεριά θερμοκηπίου σε μεσογειακές συνθήκες ($K_{cini}=0,2$: 0-30 ημέρες, $K_{cmid}=1,3$: 60-125 ημέρες και $K_{cend}=0,9$: 180 ημέρες).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει μία εικόνα του μικροκλίματος που επικρατούσε στο θερμοκήπιο κατά την περίοδο των μετρήσεων. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι μετρημένες τιμές σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν μέσω των δύο προσεγγίσεων για 20 ομοιόμορφα κατανομημένες ημέρες κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Είναι φανερό ότι και για τα δύο τμήματα το μοντέλο Stanghellini κατά κανόνα υπερεκτιμά την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ενώ το αντίθετο συμβαίνει με το μοντέλο Penman-Monteith με φυτικούς συντελεστές που προτείνονται από τους Orgaz κ.α.. Η μέση τιμή των απολύτων διαφορών και για τα δύο μοντέλα και για τα δύο τμήματα είναι ίση με $0,30 \text{ mm day}^{-1}$.

Πίνακας 7. Μέσες τιμές (για την περίοδο της ημέρας 10:00-18:00) ενδεικτικών παραμέτρων του κλίματος στο θερμοκήπιο κατά την περίοδο των μετρήσεων.

Περίοδος \ Τμήμα	T °C		T _c °C		e _s -e _a kPa	
	Fog	Control	Fog	Control	Fog	Control
Ιούλιος	29,1	32,4	26,7	29,0	1,1	2,5
Αύγουστος	28,0	30,0	25,9	27,2	1,2	1,9
Σεπτέμβριος	26,3	29,6	25,0	26,7	1,0	1,9
Οκτώβριος	24,1	28,2	24,3	25,5	1,0	1,8

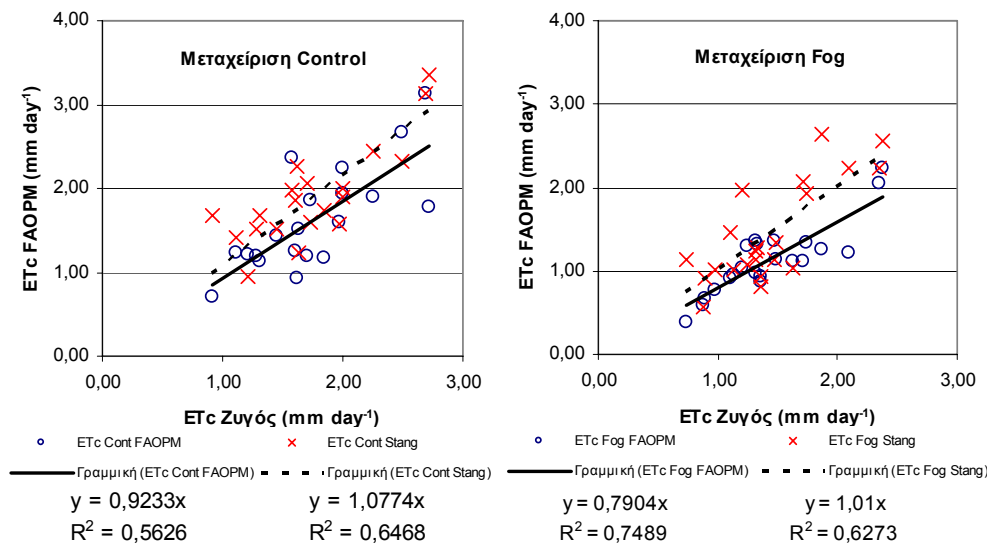


Σχήμα 2. Τιμές ET_c που μετρήθηκαν με τους λυσιμετρικούς ζυγούς (□) στα δύο τμήματα σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο FAO PM (ο) και το μοντέλο Stanghellini (x).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, για το τμήμα Control οι τιμές του R² ήταν 0,5626 και 0,6488 για τα μοντέλα FAO PM και Stanghellini αντίστοιχα, ενώ για το τμήμα Fog οι αντίστοιχες τιμές ήταν 0,7489 και 0,6273. Όσο αφορά το συντελεστή συσχέτισης (κλίση της ευθείας της γραμμικής παρεμβολής) για το τμήμα Control είχε τιμή 0,9233 και 1,0774 για τα μοντέλα FAO PM και Stanghellini αντίστοιχα, ενώ για το τμήμα Fog οι αντίστοιχες τιμές ήταν σε 0,7904 και 1,0100.

Το μοντέλο Stanghellini φαίνεται να επιτυγχάνει καλύτερη πρόβλεψη της εξατμισοδιαπνοής και στα δύο τμήματα (όπως φαίνεται από τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί αναμενόμενο μια και το μοντέλο Stanghellini έχει αναπτυχθεί με σκοπό την προσαρμογή της σχέσης Penman-Monteith στο μικροκλίμα του εσωτερικού του θερμοκηπίου [1, 2, 3, 5].

Σε κάθε περίπτωση, η αδυναμία και των δύο προσεγγίσεων να εκτιμήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα μπορεί να αποδοθεί στη δυσκολία καθορισμού φυτικών συντελεστών με γενική ισχύ για όλες τις περιπτώσεις θερμοκηπιακής καλλιέργειας πιπεριάς καθώς και της αντικειμενικής αδυναμίας ακριβούς προσδιορισμού των συντελεστών αντίστασης στη μεταφορά υδρατμών.



Σχήμα 3. Μετρημένη ETc (ημερήσια) σε σχέση με τα δύο μοντέλα υπολογισμού για τα δύο τμήματα.

Είναι προφανές ότι υπάρχει ανάγκη τροποποίησης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κατανάλωσης νερού σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες πιπεριάς, ώστε αυτές να προσαρμοστούν στις μεσογειακές συνθήκες, με ιδιαίτερη έμφαση στον υπολογισμό των συντελεστών αεροδυναμικής και επιφανειακής αντίστασης. Σε κάθε περίπτωση όμως, και τα δύο μοντέλα δίνουν την δυνατότητα μίας καλής πρώτης προσέγγισης των υδατικών αναγκών μίας καλλιέργειας πιπεριάς στο θερμοκήπιο. Μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό προγραμμάτων άρδευσης, τα οποία έτσι και αλλιώς έχουν ανάγκη προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες καλλιέργειας κατά την εφαρμογή τους στην πράξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Prenger, J.J., Fynn, R.P., Hansen, R.C., 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. Trans. ASAE, 45(6): 1779–1788,
2. Mpusia, P. T. O., 2006. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. MSc Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands
3. Donatelli, M., Bellocchi, G., Carlini, L., 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. Europ. J. Agronomy 24:186–192

4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome IT, 359 pp.
5. Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. PhD diss. Agr. Un. Wageningen. Wageningen, The Netherlands.
6. Khaoua, S.A.O., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T., Chasseriaux, G., 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. Biosys. Eng., 95(1): 83–98.
7. Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Álvarez, A.J., 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics. Agric. For. Meteorol., 125: 33–51.
8. Atarassi, R.T., Folegatti, M.V., Brasil, R.P.C., 2006. Convection regime between canopy and air in a greenhouse. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), 63(1): 77-81.
9. Hasson, A.M., 1990. Radiation components over bare and planted soils in a greenhouse. SolarEnergy, 44(1):1-6.
10. Nederhoff, E.M., Vegter, J.G., 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. Annals of Botany, 73: 353-361.
11. AL-Riahi, M., AL-Karaghoul, A., Hasson, A.M., AL. Kayassi N., 1989. Relations between radiation fluxes of a greenhouse in semi-arid conditions. Agric. For. Meteorol., 44: 329-338.
12. Κουτσογιάννης, Δ.. 2004. Διδακτικές σημειώσεις εξατμισοδιαπνοής. ΕΜΠ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.
13. Lhommea, J.P., Chehbouni, A., Elguero, E., Boulet, G., 2002. Examination of monteith's parameterization of canopy resistance, Scientific Report. ORSTOM/Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico.
14. Katerji, N., Rana, G., 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. Agric. For. Meteorol., 138:142–155.
15. Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C., 2002. Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. Biosys. Eng., 83(3): 349–359.
16. Orgaz, F., Fernandez, M.D., Bonachelac, S., Gallardoc, M. , Fereres, E., 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse Agr. Water Manag., 72: 81–96.

(205)

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Βέντζας Δ., Παναγιωτίδη Αικ.

ΤΕΙ Λάρισας, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, 411 10 Λάρισα,
ventzas@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει τα συστηματικά βήματα σχεδίασης ενός συστήματος επεξεργασίας εικόνας για διαχείριση του καλλιεργητικού περιβάλλοντος σε θερμοκήπια. Μελετά την δυνατότητα καταγραφής με εικόνα των παραμέτρων του καλλιεργητικού περιβάλλοντος και την συναγωγή συμπερασμάτων, σε χειροκίνητο και αυτόματο τρόπο λειτουργίας. Το σύστημα σκοπό έχει να ολοκληρωθεί σαν αυτόματο (μη παρακολουθούμενο από χειριστή) (Unattended Autonomous Surveillance, UAS), χρησιμοποιώντας ένα ευφύες σύστημα παρακολούθησης θερμοκηπίων (Intelligent Greenhouse Monitoring System, IGMS) βασισμένο σε τεχνολογία email, SMS (short message service) και streaming video ή MMS.

IMAGE PROCESSING TECHNIQUES IN GREENHOUSES FOR AGRICULTURAL ENVIRONMENT MANAGEMENT

Ventzas D., Panagiotidi Ek.

TEI of Larissa, School of Technological Applications, Dept. of Computer Science and
Telecommunications, 41 110 Larissa.

ABSTRACT

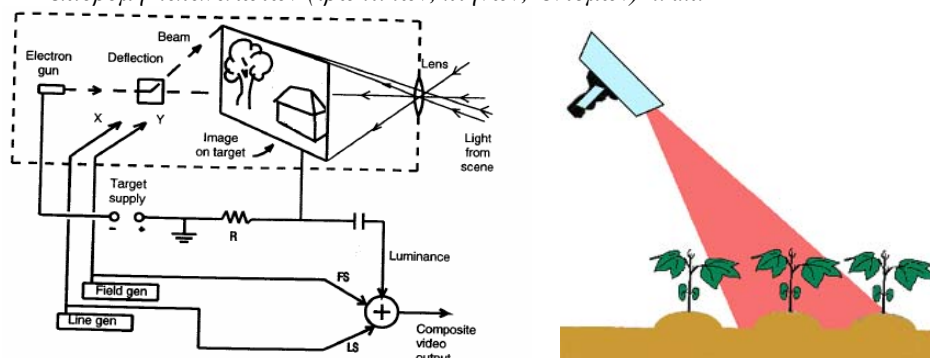
The paper presents the systematic steps to design an Image Processing software system for greenhouse agricultural environment management. By monitoring general and specific environment scenes we can parameterize the agricultural environment in a greenhouse. Decision making reliability is enhanced by expert system knowledge acquisition and comparison in automatic and manual video monitoring systems. The system is intended to be integrated into an automatic Unattended Autonomous Surveillance (UAS), by using an Intelligent Greenhouse Monitoring System (IGMS) based on email, SMS (short message service) and streaming video or MMS technology.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συστηματική σχεδίαση ενός συστήματος για διαχείριση του καλλιεργητικού περιβάλλοντος σε θερμοκήπια με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας σκοπό έχει να ολοκληρωθεί σαν αυτόματο (μη παρακολουθούμενο από χειριστή) (Unattended Autonomous Surveillance, UAS), χρησιμοποιώντας ένα ευφύες σύστημα παρακολούθησης θερμοκηπίων (Intelligent Greenhouse Monitoring System, IGMS) βασισμένο σε τεχνολογία email, SMS (short message service) και streaming video ή MMS [1], βλ. σχ. 1.. Έτσι προτείνεται:

1. Χρήση κάμερας για συνεχή, κατά διαστήματα ή οδηγούμενη από γεγονότα (event driven) [3]:

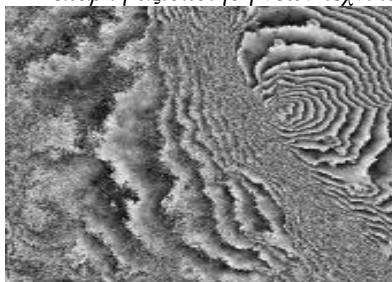
παρακολούθηση θερμοκηπίου (ανάπτυξη φυτών, κ.λ.π.)
έλεγχο καιρικών συνθηκών (χαλάζι
συγχρονισμό δραστηριοτήτων
ασφάλεια σε
εισβολή παρτίσας και κλοπής
καταστροφή δομής, πυροπροστασία
επιδρομή καταναλωτών (τροφικών, πτηνών, εντόμων) κ.λ.π.



Σχήμα 1. Σύστημα παρακολούθησης επιτήρησης θερμοκηπίων

ανίχνευση / αναγνώριση σε ασθένειες φυτών και αποχρωματισμό / κακό σχηματισμό φύλλων

έλεγχο επαρκούς άρδευσης, λίπανσης, καταπολέμησης ζιζανίων και ασθενειών
ανίχνευση ωρίμανσης καρπού για συγκομιδή
φωτισμό και ενεργητική παρακολούθηση φωτοσύνθεσης
επαρκή αξιοποίηση νέων τεχνικών (π.χ. ράντισμα με μη τοξικά υγρά)



Τηλεπισκόπηση σε 3D εικόνα
εδάφους



Τμηματοποίηση (segmentation) εικόνας
θερμοκηπίου

Σχήμα 2. Τεχνικές επεξεργασίας σήματος

2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ σε ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Η βασικότερη εφαρμογή της Πληροφορικής Τεχνολογίας Επεξεργασίας Εικόνας και Σημάτων στη Γεωργία είναι η Τηλεπισκόπηση αγρών (όρια, καλλιέργειες, εδάφη, κ.λ.π.) ακόμη και με ειδικές τεχνικές, π.χ. 3D τηλεπισκόπησης εικόνας εδάφους με χρήση της τεχνικής διαφοράς φάσης συμβολομετρίας και SAR [9]. Ωστόσο εδώ χρησιμοποιούνται απλές εικόνες και video frames από το περιβάλλον θερμοκηπίων με σκοπό την απομόνωση ιδιοτήτων μετρήσεων του καλλιεργητικού περιβάλλοντος των θερμοκηπίων, π.χ. με τεχνικές τμηματοποίησης (segmentation) της εικόνας που δίνει την ιστορία ανάπτυξης των φυτών και την κάλυψη του θερμοκηπίου και του εδάφους [4] βλ. σχ. 2. Περισσότερες εφαρμογές παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.

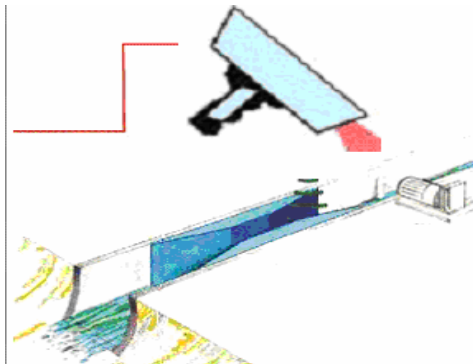
3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Στη διαχείριση θερμοκηπίων χρησιμοποιούμε τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, βλ. σχ. 3, 4 (παρακολούθηση ανάπτυξης και άρδευσης φυτών).:

1. ανάκτηση εικόνας και video
2. συνέλιξη και αλληλοσυσχέτιση
3. αναλυτικούς μετασχηματισμούς
4. γεωμετρικούς μετασχηματισμούς
5. μορφολογικούς μετασχηματισμούς
6. αριθμητικούς και σημειακούς μετασχηματισμούς, κ.λ.π.



Σχ. 3. Παρακολούθηση ανάπτυξης φυτών



Σχ. 4. Παρακολούθηση ανοικτού καναλιού άρδευσης

Στη διαχείριση περιβάλλοντος θερμοκηπίων χρησιμοποιούμε αναλυτικές (ιστόγραμμα, ταξινόμηση, απεικόνιση pixel τιμών, χαρακτηρισμό αντικειμένων και κλάσεων, τυποποίηση συνδεδεμένων στοιχείων (*connected components labelling*), ομαδοποίηση pixels σε περιοχές), αριθμητικές, σημειακές (οριακή σύγκριση (*thresholding*), προσαρμοστική σύγκριση, εξισορρόπηση ιστογράμματος, αντίθεση εικόνας, λογαριθμικοί / εκθετικοί τελεστές, κ.λ.π.), γεωμετρικές (*scaling*, περιστροφή, ανάκλαση, μετατόπιση, παραμορφώσεις, κ.λ.π.), μορφολογικές (άπλωμα, διάβρωση, άνοιγμα, κλείσιμο, μετασχηματισμό *hit & miss*, λέπτυνση, πάχυνση, σκελετοποίηση (*skeletonization*), ανίχνευση χείλους, άλλοι μετασχηματισμοί), κ.λ.π. λειτουργικές τεχνικές επεξεργασίας εικόνων [16].



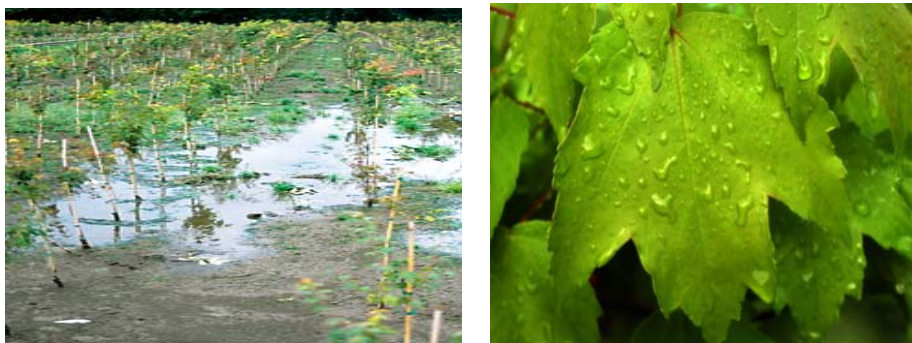
Σχήμα 5. Ταυτοποίηση φύλλων, φυτών, οργανισμών, εντόμων, ασθενειών, κ.λ.π.

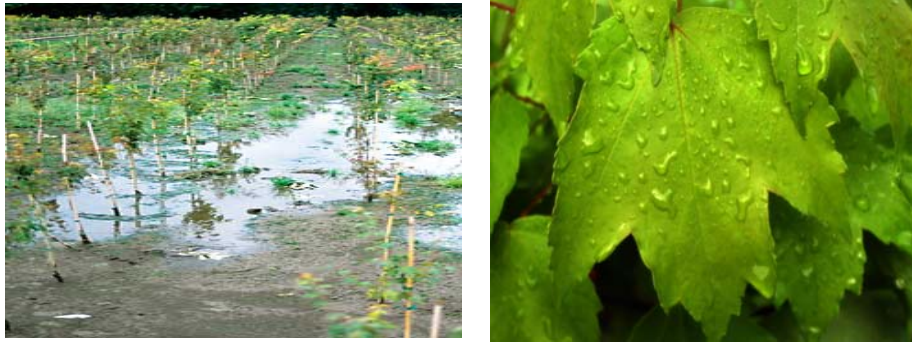
4. ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Αφύλακτα συστήματα παρακολούθησης (Unattended Autonomous Surveillance (UAS)) ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των αγροτών για ασφάλεια και αξιοπιστία εργασίας. Ένα ευφύες σύστημα καταγραφής θερμοκηπίων (Intelligent Greenhouse Monitoring System (IGMS)) χρησιμοποιεί και τεχνολογία MMS. Εικόνες και περιεχόμενα video συλλέγονται με προσαρμοστικές οπτικές cameras και μετά από συνεχή επεξεργασία εικόνας ανταποκρίνονται σε απρόσμενη μεταβολή κατάστασης (π.χ. εισβολή παρτίσας στο θερμοκήπιο ή καταστροφικά καιρικά φαινόμενα, κ.λ.π.), το σύστημα επικοινωνεί και ειδοποιεί τον αγρότη, αναμεταδίδοντας και εικόνες μέσω SMS, streaming video, MMS ή email [2], [8], [11]. Επίσης είναι δυνατή η παρακολούθηση:

- ηλιακού ή τεχνητού φωτισμού, άρα και έμμεσα της φωτοσύνθεσης
- βιολογικών οργανισμών (παραγωγών (φυτών), καταναλωτών (ζώων και εντόμων) και αποσυνθετιών (μικροοργανισμών και εντόμων)

Η τεχνική επεξεργασίας σήματος, εικόνας και video χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό / διαχωρισμό φυτών και καλλιεργείων στην ταυτοποίηση φύλλων, βλ. σχ. 5, φυτών, οργανισμών, εντόμων και τρωκτικών, ασθενειών, εξάπλωσης ασθενειών, συνθηκών και ακεραιότητας φύλλων σε εικόνες εμφανών μερών





Σχήματα 6. Προβλήματα εικόνων σε άρδευση θερμοκηπίων

Η παράλληλη και σύνθετη χρήση της άρδευσης για λίπασμα, πότισμα, εντομοκτονία (με εντομοκτόνα ή με μη τοξικά διαλύματα) και η γενικότερη διαχείριση σε διαφορετικές ώρες της ημέρας εξοικονομούν νερό, ενέργεια και αποτελέσματα και καθιστούν την διαχείριση νερού μέσα στο θερμοκήπιο μία σύνθετη και πολύπλοκη διεργασία που ελέγχεται με απλές συμβατικές μεθόδους [4, 5], , βλ. σχ. 6. Η παρακολούθηση του εδάφους, η υγρασία των φύλλων και τα συμβάντα της βροχής και της άρδευσης (με ή χωρίς λίπασμα και εντομοκτόνα) είναι δυνατή υπό σταθερές συνθήκες φωτισμού.



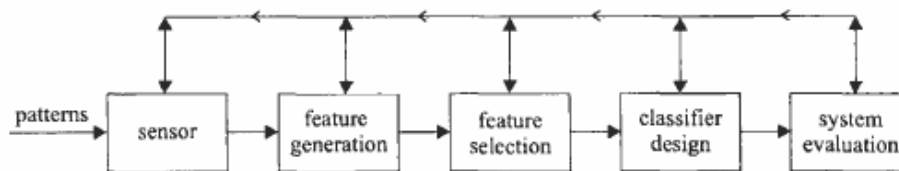
Σχήμα 7. RGB εικόνες για ανίχνευση χρόνου συγκομιδής και ωρίμανσης καρπών

Οι ρίζες των φυτών και η κάλυψη με χώμα μειώνει την εξάτμιση του νερού. Η δομή (ύφανση, texture) του εδάφους, ο αερισμός του κάτω μέρους του φυτού (αραιώμα), η διαπερατότητα, η διάβρωση και η ικανότητα κατακράτησης νερού είναι δυνατόν να μελετηθούν με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας. Είναι σαφής η δυσκολία αυτόματης ανάκτησης εικόνας εδάφους σε πολλά θερμοκήπια.

Οι μεταβλητές κατάστασης (state variables) ενός θερμοκηπίου που θα πρέπει να «μετρηθούν» [10] από μία camera με παρατήρηση των εικόνων είναι: εσωτερική / εξωτερική θερμοκρασία, υγρασία, δροσισμός, επάρκεια άρδευσης, ταχύτητα αέρα, αερισμός, ηλιακή ακτινοβολία, ανάπτυξη φυτών, έντομα και παράσιτα, καλύμματα φυτών, ενδιάμεσες φυτεύσεις, απώλειες, διάβρωση, ευτροφισμός, λιπάσματα, συστατικά (αδύνατο να μετρηθεί, αλλά μπορεί να παρακολουθηθεί με κάμερα), κλπ.

Ανίχνευση χρόνου συγκομιδής και ωρίμανσης καρπών σε RGB εικόνες, οδηγεί σε μείωση κόστους και φθορών [6], , βλ. σχ. 7. Τα βασικά βήματα στη σχεδίαση ενός συστήματος ταξινόμησης ωρίμανσης καρπών είναι, , βλ. σχ. 8:

Εικόνα → χαρακτηριστικό (χρώμα, κ.λ.π.) → σχεδίαση ταξινομητή (classifier) → εκτίμηση



Σχήμα 8. Αναγνώριση / ταξινόμηση χαρακτηριστικών εικόνων



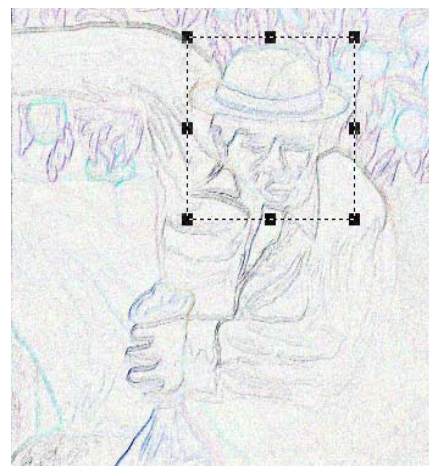
Επίθεση πτηνών ή και εντόμων - Η προσέγγιση κοπαδιού καταναλωτών παρουσιάζει διαφορετικά προβλήματα στις τεχνικές επεξεργασίας σήματος σε σύγκριση με ανίχνευση μεμονωμένων καταναλωτών



Κατεστραμμένα φυτά από καταναλωτές – Χειροκίνητη εκπαίδευση software, μπορεί να αποφασίσει για την φθορά των φυτών και την έκταση φθοράς



Καταστροφές δομής θερμοκηπίου – έλεγχος ακεραιότητας



Ανίχνευση και συναγερμός παραβίασης θερμοκηπίου [2], [11]

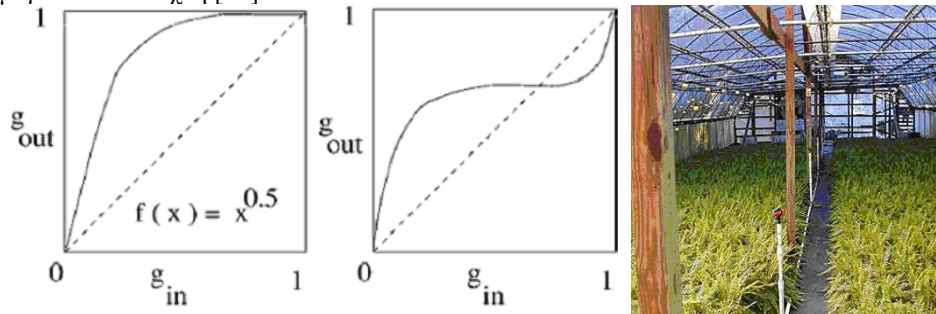
Σχήμα 9. Προβλήματα επεξεργασίας εικόνας και ανάδειξης χαρακτηριστικών σε θερμοκήπιο

Για την ανίχνευση και **συναγερμό** παραβίασης του θερμοκηπίου (intruder alarm) χρησιμοποιούνται τεχνικές αφαίρεσης διαδοχικών frames video [2], [11] και συνέλιξης μάσκας ανθρώπινης φιγούρας ή προσώπου με παράλληλη χειροκίνητη λειτουργία του συστήματος (επιτήρηση από φύλακα). Η επιτυχία αυτόματου συναγερμού μπορεί να φτάσει το 94% [7]. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται για ανίχνευση μικρών και μεγάλων καταστροφών δομής θερμοκηπίου και για έλεγχο ακεραιότητας, βλ. σχ. 9.

5. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ

Όταν οι αρχικές εικόνες είναι σκοτεινές, η διόρθωση-γ με $f(x)=x^{0.5}$ αναδεικνύει τα σκοτεινά περισσότερα από τα φωτεινά pixels και διακρίνονται πιο καθαρά τα διάφορα αντικείμενα (φυτά, καρποί, έντομα, κ.λ.π.) της εικόνας, βλ. σχ. 10, με τεχνικές μαλακών ή σκληρών ορίων (thresholding), βλ. σχ. 11.

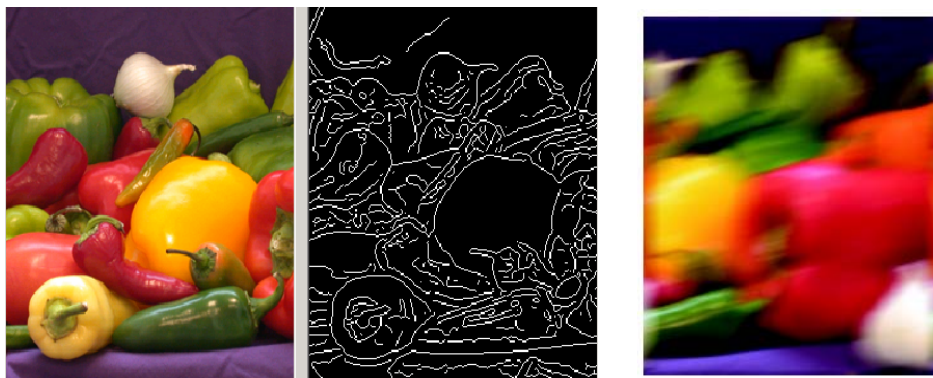
Μία άλλη τεχνική ανάδειξης εικόνας είναι οι υφάνσεις (textures) αποτελούνται από οργανωμένα (textons), επηρεάζεται δε από τον φωτισμό, την ανακλαστικότητα των επιφανειών, κ.λ.π. Στην τμηματοποίηση εγχρώμων εικόνων ορισμένα χρώματα μεγεθύνουν τα ίχνη [15].

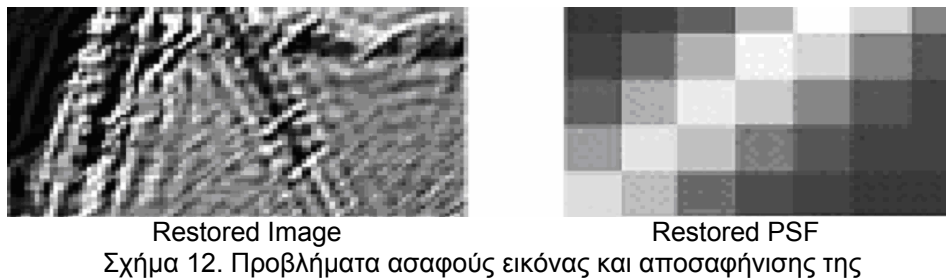


Σχήμα 10. Προβλήματα φωτισμού -βάθους σε περιβάλλον θερμοκηπίου

Η ασάφεια (blur) και η υποβάθμιση (degradation) της εικόνας, προκαλούνται από:

- κίνηση κατά την σύλληψη (image capture)
- μεγάλη ή μικρή έκθεση του φιλμ (exposure time, χρόνος διαφράγματος)
- μη εστιασμένα (out-of-focus) οπτικά
- χρήση ευρυγώνιων φακών
- ατμοσφαιρικές παρεμβολές
- διάχυση φωτός, κ.λ.π.





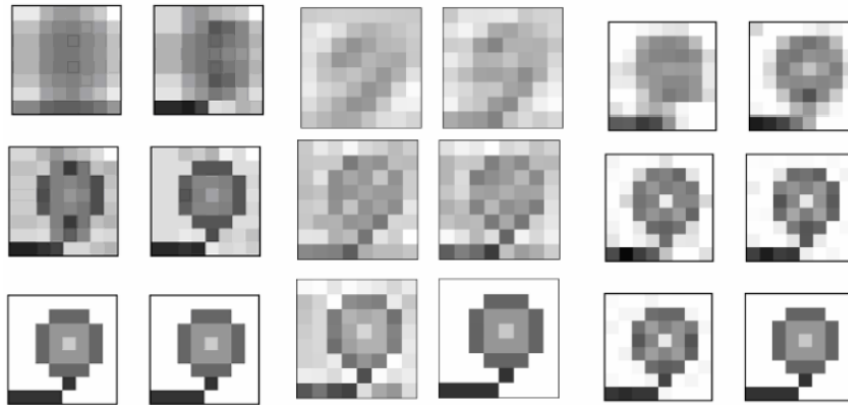
Το μοντέλο αποσαφήνισης (deblurring) μίας ασαφούς εικόνας περιγράφεται μαθηματικά σαν: $\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{n}$, όπου $\mathbf{g}$ = η ασαφής εικόνα $\mathbf{f}$ = η αρχική σωστή εικόνα, $\mathbf{H}$ = ο τελεστής παραμόρφωσης (distortion operator), που ονομάζεται και σημειακή συνάρτηση απλώματος (point spread function, PSF). Η συνάρτηση αυτή συνελίσσεται με την εικόνα και παράγει την παραμορφωμένη εικόνα, βλ. σχ. 12.

$\mathbf{n}$ = ο πρόσθετος θόρυβος διάβρωσης της εικόνας.

Η αποσαφήνιση ασαφών εικόνων γίνεται με επαναληπτικές παραμετρικές τεχνικές και φίλτρα (deconvolution), απομάκρυνση του θορύβου (artifacts) και αναδεικνύοντας παλαιά και κρυμμένα χαρακτηριστικά της αρχικής εικόνας, προϋποθέτει κάποια ελάχιστη γνώση των χαρακτηριστικών συχνότητας της εικόνας και του πρόσθετου θορύβου. Χωρίς θόρυβο αρκεί κάποιο αντίστροφο φίλτρο. Η αποσαφήνιση γίνεται χρησιμοποιώντας μία PSF συνάρτηση για θόλωση / αποσαφήνιση της εικόνας. Η ακριβής γνώση της PSF συνάρτησης βοηθά στην αποσαφήνιση της εικόνας με την χρήση συνέλιξης, δηλ.:

- μείωση της επίδρασης της ενίσχυσης θορύβου (από camera ή από background)
- βελτίωση της μη ομοιόμορφης ποιότητας εικόνας (λάθος pixels, επίπεδο πεδίο κ.λ.π.)
- βελτίωση διακριτικής ικανότητας αποκατασταθείσης εικόνας

Χρησιμοποιούνται φίλτρα (damping) για να μειωθεί ο θόρυβος υψηλών συχνοτήτων (*ringing*) κατά την αποκατάσταση (restoration) της εικόνας [15].



Σχήμα 13. Ιδιο-εικόνες (eigen images) κατάλληλες για ανίχνευση χαρακτηριστικών φυτών

6. ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ένα θερμοκήπιο παρουσιάζει πολυπλοκότητα και ποικιλία εικόνων και η αυτοματοποίηση των αναγκών παρακολούθησης με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας απαιτεί αξιοπιστία αποτελεσμάτων [5], [6], [7]. Η εκπαίδευση ενός τέτοιου συστήματος είναι τελικά πολύ δύσκολη και η δική μας αρχική προσέγγιση είναι ο παραλληλισμός του αυτόματου με το χειροκίνητο σύστημα επιτήρησης [12], [13], [14]. Η εκπαίδευση μπορεί να συνεχισθεί επί αόριστον με αυτό-εκπαίδευση ενός Έμπειρου συστήματος. Εστιάζουμε περισσότερο σε καταστάσεις όπου το σύστημα επιτήρησης μπορεί να καταρρεύσει με αντιφατικές ερμηνείες, δράσεις και αποτελέσματα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημοσίευση καταγράφει τις καλλιεργητικές παραμέτρους ενός θερμοκηπίου και προσπαθεί να τις μετρήσει, διακριβώσει και ελέγξει με τεχνικές επεξεργασίας σήματος και εικόνας. Τα παραπάνω διερευνώνται, μελετώνται και προγραμματίζονται στα πλαίσια των δραστηριοτήτων του Μεταπτυχιακού προγράμματος και του Εργαστηρίου Επεξεργασίας Σήματος και Εικόνας του ΤΕΙ Λάρισας, του Τμήματος Τεχνολογίας Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών και της ενασχόλησης των Μεταπτυχιακών φοιτητών μας με εφαρμοσμένη Επεξεργασία Εικόνας σε εικόνες και video πλαίσια (frames) και προβλήματα από γεωργικά περιβάλλοντα. Η εργασία συμπεριλαμβάνει συναγεμικούς καταστάσεων, παρακολούθηση καιρού και συνθηκών φωτισμού, άρδευσης, διαχείρισης λιπασμάτων, ανάπτυξης και ωρίμανσης φυτών, κ.λ.π. [10]. Έχουν μελετηθεί off-line αλγόριθμοι ανίχνευσης των παραπάνω προβλημάτων και μελετάται τεχνολογία για την on-line υλοποίησή τους. Η εργασία αυτή επιβεβαιώνει την δυνατότητα παρακολούθησης των διεργασιών και δραστηριοτήτων σε ένα θερμοκήπιο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Argus Controls, Irrigation and Fertilization Controls, *Argus System*, 1998
2. Dracos, G, Motion Detection Algorithms, Semester MSc Assignment, MSc in Computer Science, ATEI Larissa – Staffordshire University, Larissa, 2006
3. Gavish Software & Equipment, *Advanced Greenhouse Control Systems*, 1998
4. Hashimoto, Y, Nonami, H, *The Computerized Greenhouse: Automatic Control Application in Plant Production*, Academic Press, March 1993

5. Kapsalis A.V., Gravanis F.T. & Gowen S.R. (2002). Nematode entomopathogenic symbiotic bacteria acting as biological agents against tomato seedlings fungal pathogens. *Proceedings of the BCPC Conference - Pests & Diseases 2002*. Vol. 2: 749 – 752, Brighton, U.K.
6. Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G., Lykas, Ch., 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Biosystems Engineering*, 93(2): 237-244.
7. Kittas C., Boulard T., Papadakis G. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings. Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 1997, Vol 40, No 2, 415-425.
8. Kokkinos, K, Mastorodimos, G, A New Compression Algorithm for Image Processing, Larissa, paper to appear, 2007
9. Κουμαρίδης Δημήτριος, *Η επεξεργασία σήματος στα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης - εφαρμογές*, Πτυχιακή εργασία, ΑΤΕΙ Λάρισας, ΣΤΕΦ, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Λάρισα 2004
10. Sigrimis, N, Fillipopoulos C, Optimal Greenhouse Controller, *AMSE Conference Proceedings*, Athens 1984
11. Spanou Irene, *Face recognition system*, Semester MSc Assignment, MSc in Computer Science, ΑΤΕΙ Larissa – Staffordshire University, Larissa, 2006
12. Yokogawa Hokushin Electric Co, Skyfarm, 1987, *YEW*, Tokyo, Japan
13. Ventzas D. E, *Control Systems I, II, III*, Lecture Notes, TEI Lamia, Dpt. Electronics Eng, Lamia, Greece, 1995
14. Ventzas D. E, MC68HC11 microcontroller control of a greenhouse environment as a time delay system, *IFAC 1998: Workshop on Applications of Automatic Control and Ergonomics on Agriculture*, 1998, Athens
15. Ventzas, D, *Signal Processing*, Lecture Notes, TEI Larissa, 2005
16. Ventzas, D, *Image Processing*. Lecture Notes for MSc in Computer Science,, TEI Larissa, 2007.

(208)

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Κ. Μπαξεβάνου¹, Θ. Μπαρτζάνας¹, Δ. Φείδαρος¹, Κ. Κίττας^{1,2}

¹Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Αγροοικοσυστημάτων, Κέντρο Έρευνας,
Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1^η

Βιομηχανική Περιοχή, 38500 Βόλος, baxevanou@uth.gr, bartzanas@cereteth.gr

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής
Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και
Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερευνάται αριθμητικά η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό ενός τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου με συνεχή πλαϊνά κατακόρυφα ανοίγματα αερισμού και καλλιέργειας τομάτας. Σε δυσδιάστατο μοντέλο πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Η εμφάνιση ανακυκλοφοριών λόγω θερμικής άνωσης αναδεικνύει ως σημαντική την επίδραση της φυσικής συναγωγής παρά τη δεσπόζουσα εξαναγκασμένη συναγωγή του εισερχόμενου εξωτερικού αέρα, από τα ανοίγματα αερισμού.

SOLAR RADIATION DISTRIBUTION IN A TUNNEL GREENHOUSE – A CFD STUDY

**Catherine Baxevanou¹, Dimitrios Fidaros¹, Thomas Bartzanas¹,
Constantinos Kittas^{1,2}**

¹Center for Research and Technology of Thessaly, Institute of Technology and
Management of Agricultural Ecosystems, Technology Park of Thessaly, 1st Industrial
Area, 38500 Volos, baxevanou@uth.gr, bartzanas@cereteth.gr

²University of Thessaly, Department of Agriculture, Crop Production and
Agricultural Environment, Fytokou St., N. Ionia, GR-38446, Magnisia, Greece

ABSTRACT

The effect of solar radiation distribution in an arc type tunnel greenhouse equipped with continuous side vents was numerically investigated. Based on the meteorological data of October, a parametric study was carried out for different solar radiation incidence angle. The results show the influence of the incidence angle of the incoming solar on the distribution of solar radiation inside the greenhouse. The flow recirculation due to buoyancy effect shows the importance of internal temperature gradients although the dominance of the forced convection resulted from natural ventilation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο για την ανάπτυξη των φυτών, καθώς αποτελεί την πηγή ενέργειας τόσο για τη φωτοσύνθεση των φυτών όσο και για τη θέρμανση του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου, τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, τη γεωμετρία της καλλιέργειας καθώς επίσης και από τις οπτικές ιδιότητες του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου. Η κατανομή λοιπόν της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων δεν είναι ομοιογενής και αυτή η ετερογένεια επηρεάζει σημαντικά τις φυσιολογικές δραστηριότητες της καλλιέργειας, κυρίως τη διαπνοή και τη φωτοσύνθεση.

Οι περισσότερες προσπάθειες διερεύνησης της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό θερμοκηπίων χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους και συνήθως αδυνατούν να συμπεριλάβουν στους υπολογισμούς όλους εκείνους τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι, η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας διερευνήθηκε πειραματικά από τους Kurata et al. [1], και Tourdonnet et al. [2], ενώ η ανομοιομορφη κατανομή της επιβεβαιώθηκε και πειραματικά από τους Graham et al, [3] και Wang and Boulard [4]. Οι Tragmar et al. [5] χρησιμοποιώντας γεωστατιστικές μεθόδους βρήκαν ότι υπάρχουν διακριτές ζώνες υψηλών και χαμηλών τιμών της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR), μέσα στο θερμοκήπιο λόγω της σκίασης από το σκελετό του θερμοκηπίου, τον υπερκείμενο εξοπλισμό και την καλλιέργεια. Ο Vougioukas [6] παρουσίασε έναν αριθμητικό αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει την κατανομή της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και ο οποίος βασίζεται σε ένα γενικό προσομοίωμα ακτινοβολίας παρόμοιο με αυτά που χρησιμοποιούνται σε υπολογιστικές γραφιστικές εφαρμογές [7].

Σε όλες όμως τις παραπάνω εργασίες διερευνάται μόνο η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που έχει η ετερογένεια της κατανομής της στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Οι αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως επί το πλείστον για τη διερεύνηση της κατανομής της ακτινοβολίας δεν μπορούν να συμπεριλάβουν και τη κατανομή των υπολοίπων βαθμωτών μεταβλητών ενώ είναι και πολύ δύσκολο να μετρηθούν αυτές οι παράμετροι πειραματικά.

Η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, όμως, κατέστησε εφικτή τη χρήση αριθμητικών μεθόδων στη προσομοίωση των ροών. Η χρήση των μεθόδων της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) παρέχει τη δυνατότητα εξέτασης διαφόρων μεταβλητών, φυσικών διεργασιών χωρίς την ανάγκη χρονοβόρων και πολυέξοδων πειραμάτων. Η μέθοδος βρήκε γρήγορα εφαρμογή και στα αγροτικά κτίρια. Οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και για την προσομοίωση του φυσικού αερισμού σε ανοιχτά [8-10] και κλειστά θερμοκήπια [11] σε κτηνοτροφικά κτίρια [12] για τον υπολογισμό φορτίων ανέμου σε τοξωτό θερμοκήπιο [13], για τη διερεύνηση των διχτύων εντομοστεγανότητας στο μικροκλίμα θερμοκηπίων [14] και για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των υλικών κάλυψης θερμοκηπίων [15].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τη διερεύνηση της κατανομής της ακτινοβολίας και του μικροκλίματος στο εσωτερικό ενός τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου με καλλιέργεια τομάτας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Το αριθμητικό προσομοίωμα

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Fluent [16] ο οποίος προσαρμόστηκε κατάλληλα για είναι λειτουργικός σε περιβάλλον θερμοκηπίου. Η ροή εντός του θερμοκηπίου θεωρήθηκε δυσδιάστατη (2D), μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρβώδης. Τα φαινόμενα ροής και μεταφοράς θερμότητας περιγράφονται από τις εξισώσεις Navier-Stokes. Οι Reynolds Averaged Navier-Stokes εξισώσεις για τη συνέχεια, την ορμή και τη μεταφορά ενέργειας έχουν αναλυθεί και σε προηγούμενες εργασίες [8-14] και δεν θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της φυσικής συναγωγής η μεταβολή της πυκνότητας λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας το μοντέλο Boussinesq. Η χρήση του μοντέλου αυτού προσφέρει ταχύτερη σύγκλιση. Σε αυτό το μοντέλο η πυκνότητα θεωρείται σταθερή (ανεξάρτητη της θερμοκρασίας) σε όλες τις εξισώσεις εκτός από αυτή με την οποία υπολογίζουμε τον όρο πηγής της εξίσωσης ορμής που αντιστοιχεί στη θερμική άνωση.

Προκειμένου να προσομοιώσουμε την επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο κάλυμμα χρησιμοποιείται το μοντέλο ακτινοβολίας διακριτής κατεύθυνσης (Discrete Ordinates – DO). Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την προσομοίωση ημι-περατών τοιχωμάτων. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της ακτινοβολίας και των οπτικών ιδιοτήτων για διαφορετικά μήκη κύματος. Έτσι λοιπόν είναι κατάλληλο για την προσομοίωση συμπεριφοράς υλικών των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται με το μήκος κύματος και η λειτουργικότητά τους οφείλεται σε αυτό ακριβώς το γεγονός, ορίζοντας για αυτά φασματικούς συντελεστές.

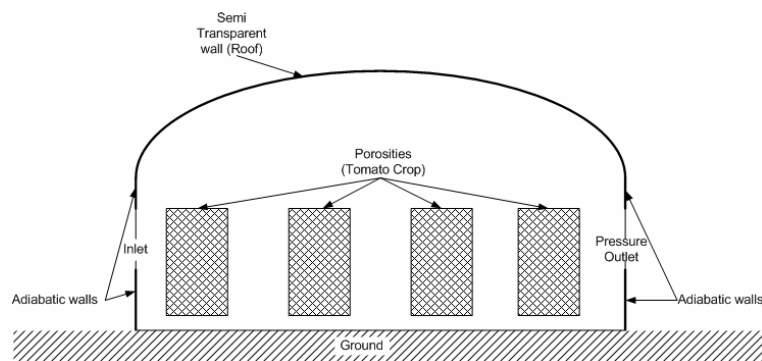
Το μοντέλο ακτινοβολίας DO επιλύει μια εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας για πεπερασμένο αριθμό διακριτών στερεών γωνιών, η κάθε μια από τις οποίες σχετίζεται με συγκεκριμένη σταθερή κατεύθυνση $\vec{s}$ στο γενικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Έτσι η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας μετατρέπεται σε μια γενική εξίσωση μεταφοράς της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις χωρικές συντεταγμένες (x,y,z). Το μοντέλο DO λύνει τόσες εξισώσεις μεταφοράς όσες είναι και οι επιλεγμένες διευθύνσεις $\vec{s}$ [2-4]. Η εξίσωση μεταφοράς για τη φασματική ένταση ακτινοβολίας, $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ δίνεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (1)$$

Ο συντελεστής διάθλασης, ο συντελεστής σκέδασης και η φασματική συνάρτηση, Φ , θεωρούνται ανεξάρτητες από το μήκος κύματος. Η φασματική συνάρτηση, Φ , θεωρείται ισοτροπική. Η στερεή γωνία 4π σε κάθε σημείο του χώρου διακριτοποιείται σε $N_\theta \times N_\phi$ στερεές γωνίες ω_i , οι οποίες ονομάζονται γωνίες ελέγχου. Οι γωνίες θ και ϕ είναι η πολική και αζιμουθιακή γωνία και μετρούνται ως προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z). Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιείται μια διακριτοποίηση 3×3 . Αν και στην εξίσωση αυτή ο συντελεστής διάθλασης λαμβάνεται μονάδα, ωστόσο για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας μέλανος σώματος καθώς και για την τιμή των οριακών συνθηκών που επιβάλλονται στη διεπιφάνεια ημι-περατού τοίχου και ρευστού λαμβάνεται υπόψη η πραγματική φασματική τιμή του συντελεστή διάθλασης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός κώδικας Fluent, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως βάση [16] και στον οποίο ενσωματώθηκε εξωτερικός κώδικας για διάφορα υπο-μοντέλα και οριακές συνθήκες (σε γλώσσα C). Οι σχετικές εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιώντας ένα διδιάστατο δομημένο πλέγμα αποτελούμενο από 20.000 κελιά. Για τη ζεύξη της

εξίσωσης συνέχειας με τις εξισώσεις ορμής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE [15]. Οι όροι συναγωγής στις RANS εξισώσεις μεταφοράς διακριτοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το σχήμα SOU και για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιήθηκαν κεντρικές διαφορές. Η τύρβη περιγράφεται από το $k - \epsilon$ προσομοίωμα μοντέλο δύο εξισώσεων [17]. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε στο 10^{-7} για τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και τύρβης και στο 10^{-8} για τις εξισώσεις της ενέργειας και της ακτινοβολίας. Η υπόθεση αναφοράς που εξετάστηκε αφορά ένα θερμοκήπιο τύπου τούνελ με τη γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Γεωμετρία του πεδίου ροής θερμοκηπίου τύπου τούνελ

Από το αριστερό άνοιγμα εισέρχεται αέρας με δεδομένη καθ ύψος κατανομή, ένταση τύρβης 3% και θερμοκρασίας 289.2 K. Ως καθ ύψος κατανομή για την ταχύτητα του εισερχόμενου ρεύματος αέρα λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί σε πλήρως αναπτυγμένη τύρβη σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο. Στο δεξιό άνοιγμα εφαρμόζεται ως οριακή συνθήκη εξόδου σταθερή κλίση πίεσης. Το κάλυμμα θεωρείται τοίχος πεπερασμένου πάχους από ημι-διαφανές υλικό. Συνεπώς θεωρείται στερεό μέσα στο οποίο επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής. Στο εξωτερικό όριο του στερεού καλύμματος εφαρμόζεται μικτή οριακή συνθήκη (συνδυασμός ακτινοβολίας και συναγωγής). Η ίδια οριακή συνθήκη εφαρμόζεται και στο εσωτερικό όριο του στερεού καλύμματος και υπάρχει σύζευξη μεταξύ των περιοχών στερεού και ρευστού. Οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται αδιαβατικές και αδιαφανείς επιφάνειες διάχυσης. Το έδαφος θεωρείται αδιάφανες και ακτινοβολούσα επιφάνεια διάχυσης. Τα φυτά προσομοιώνονται με πορώδη υλικά τα οποία εμφανίζουν στο πεδίο ροής ιξώδη και αδρανειακή αντίσταση [16].

Πίνακας 1 Παραμετρική μελέτη ηλιακής γωνίας

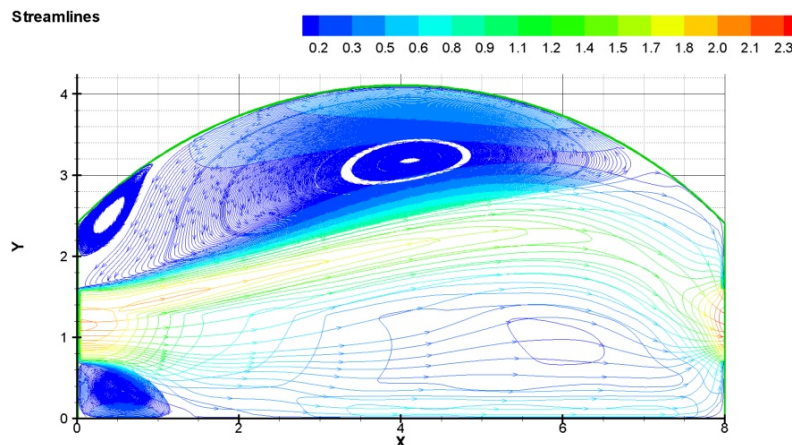
Περίπτωση	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας [W/m^2]			Ηλιακή γωνία [$^\circ$]
	UV	PAR	NIR	
Περίπτωση 1	16.56	132.5	116	-60
Περίπτωση 2	33.75	270	236	-30
(Αναφοράς)				
Περίπτωση 3	40	320	280	0
Περίπτωση 4	33.75	270	236	30
Περίπτωση 5	16.56	132.5	116	60

Η παραμετρική μελέτη που επιλύεται αφορά μια τυπική μέρα του Οκτωβρίου στην περιοχή του Βόλου και τη μελέτη 5 ηλιακών γωνιών. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατανέμεται σε τρεις κλάσεις μήκους κύματος: την υπεριώδη ($\lambda=0.01 - 0.4 \mu m$ - UV),

την ορατή (ή περιοχή ενεργής φωτοσύνθεσης -PAR) ($\lambda=0.4 - 0.76\mu\text{m}$) και την περιοχή κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία ($\lambda=0.76 - 1.1\mu\text{m} - \text{NIR}$). Στον πίνακα 1 δίνεται η ολική ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά περιοχή μήκους κύματος. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ότι η διάχυτη ακτινοβολία εκπροσωπεί ένα 24% της συνολικής ακτινοβολίας.

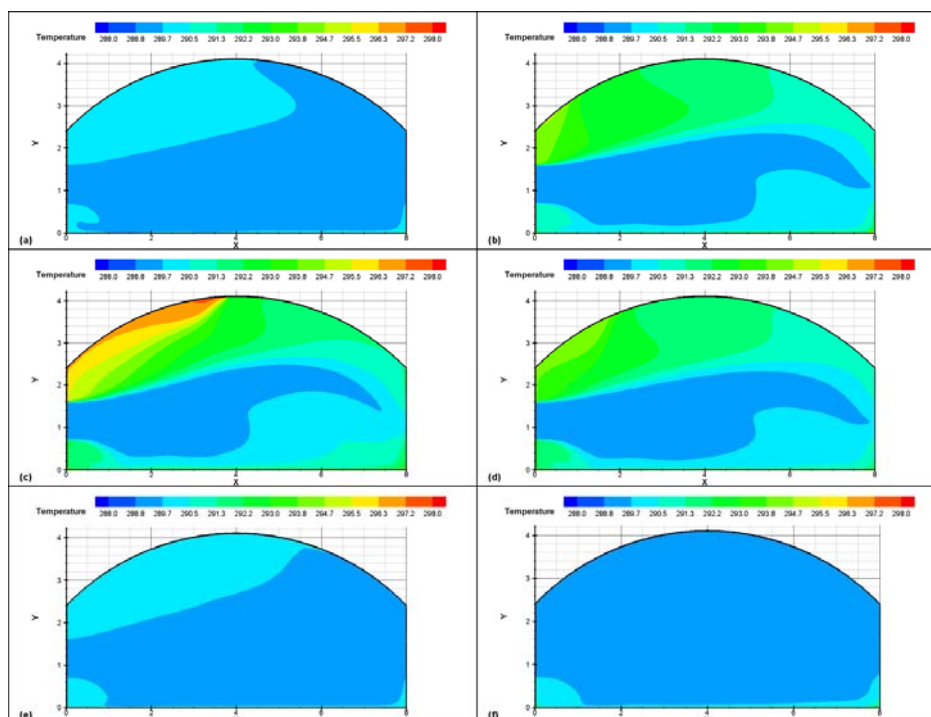
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το πεδίο των γραμμών ροής της υπόθεσης αναφοράς. Το βασικό χαρακτηριστικό της ροής είναι η ισχυρή συναγωγή που επιβάλλει το εισερχόμενο ρεύμα αέρα. Η ροή 'αποσβένεται' από τα φυτά και διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το κύριο από τα δύο ρεύματα, το πιο ισχυρό, περνάει πάνω από τα φυτά ενώ το δευτερεύον, και πιο αργό, από κάτω. Οι ταχύτητες μέσα στην πορώδη περιοχή που προσομοιώνει την ύπαρξη των φυτών, μειώνεται λόγω ιξώδους και αδρανειακής αντίστασης. Τρεις βασικές ανακυκλοφορίες παρατηρούνται. Οι δύο από αυτές εμφανίζονται στις άνω και κάτω γωνίες της πλευράς εισόδου παγιδεύοντας μικρές ποσότητες ρευστού. Η τρίτη, εγκαθίσταται ανάμεσα στο κάλυμμα και στο κύριο ρεύμα της ροής. Παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του συνολικού πεδίου ροής και θερμοκρασίας (όπως θα φανεί αργότερα), καθώς διαχωρίζει το συνολικό πεδίο σε δύο διακριτές περιοχές. Το εκτεταμένο μέγεθος της συγκεκριμένης ανακυκλοφορίας οφείλεται στη δισδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος. Αυτό αντιστοιχεί σε θερμοκήπιο με συνεχή πλαϊνά κατακόρυφα ανοίγματα αερισμού.



Σχήμα 2. Γραμμές ροικής συνάρτησης εντός θερμοκηπίου για την υπόθεση αναφοράς

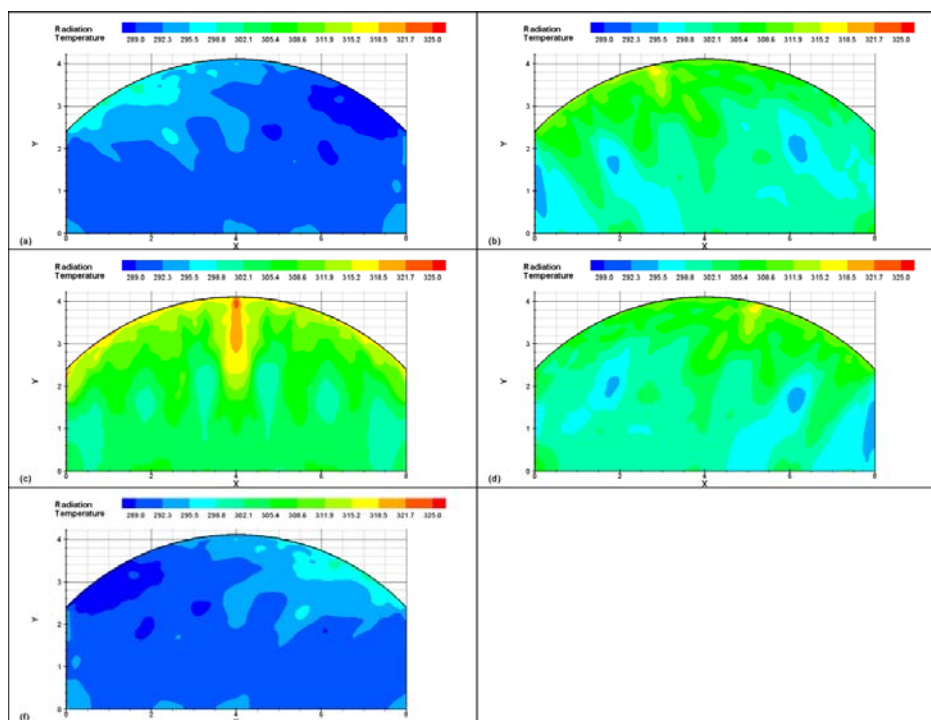
Στο Σχήμα 3 δίνονται οι ισοϋψείς θερμοκρασίας για τις πέντε τιμές της ηλιακής γωνίας της παραμετρικής μελέτης (πίνακας 1) συν μια επιπλέον περίπτωση κατά την οποία δεν εφαρμόζεται καθόλου το μοντέλο ακτινοβολίας. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η εξαναγκασμένη συναγωγή. Στην περίπτωση (f), η θερμοκρασία του εισερχόμενου ρεύματος κυριαρχεί σε όλο το πεδίο εκτός από τις περιοχές πολύ κοντά στο έδαφος και στις κάτω γωνίες των πλαϊνών τοιχωμάτων, όπου η τιμή της επηρεάζεται από το θερμότερο έδαφος λόγω των χαμηλών ταχυτήτων της ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 3. Ισοϋψείς θερμοκρασίας για διαφορετικές ηλιακές γωνίες (a-e) a) - 60ο, b) - 30ο, c) 0ο, d) 30ο, e) 60ο και f) χωρίς μοντέλο ακτινοβολίας.

Σε όλες τις περιπτώσεις (a-e), υπάρχει ένας, σχεδόν αναλλοίωτος, βασικός πυρήνας ροής, ενώ η θερμοκρασία, συνολικά, δε δείχνει να μεταβάλλεται σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη της ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας σε μικρές περιοχές κοντά στο κάλυμμα εντός της μεγάλης ανακυκλοφορίας ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης. Περιπτώσεις με ίδια ισχύ προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά συμμετρικές γωνίες πρόσπτωσης παρουσιάζουν παρόμοια αλλά όχι ίδια θερμοκρασιακά πεδία λόγω της επίδρασης των δυνάμεων θερμικής άνωσης. Όσο υψηλότερη είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας τόσο εντονότερη είναι η διαφοροποίηση του θερμοκρασιακού πεδίου κοντά στο κάλυμμα.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης θερμοκρασίας ακτινοβολίας για τις περιπτώσεις (a-e). Ως ισοδύναμη θερμοκρασία ακτινοβολίας ορίζεται η θερμοκρασία με την οποία μέλαν σώμα θα ακτινοβολούσε την ίδια ποσότητα ενέργειας. Αυτές οι ισοϋψείς αποκαλύπτουν τη σημαντική επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Δεδομένου ότι οι διαφορές θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου είναι σχετικά μικρές, οι κατανομές αυτές δίνουν ένα μέτρο της εισερχόμενης ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο. Η τιμή της ισοδύναμης θερμοκρασίας είναι ανάλογη με αυτή της έντασης της ακτινοβολίας που περνάει από κάθε σημείο. Περιπτώσεις με συμμετρικές ηλιακές γωνίες παρουσιάζουν σχεδόν συμμετρικές ισοϋψείς.



Σχήμα 4. Ισοϋψείς ισοδύναμης θερμοκρασίας ακτινοβολίας για διαφορετικές ηλιακές γωνίες (a-e) a) – 60°, b) -30°, c) 0°, d) 30° και e) 60°

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προσομοιώθηκε επιτυχώς η ροή εντός θερμοκηπίου τύπου τούνελ με πλήρως ανοιχτά τα πλαϊνά ανοίγματα σε όλο το μήκος του, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων και το μοντέλο DO για την ακτινοβολία. Στη ροή αναγνωρίζεται η επίδραση τριών κύριων παραγόντων: το ισχυρό ρεύμα εισόδου αέρα από το πλαϊνό άνοιγμα, την παρουσία φυτών τα οποία συμπεριφέρονται ως πορώδη εμπόδια και τη μεγάλη ανακυκλοφορία κοντά στο κάλυμμα όπου οι δυνάμεις θερμικής άνωσης, προερχόμενες από την εισερχόμενη ακτινοβολία παίζουν σημαντικό ρόλο. Η επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για ηλιακές γωνίες μεγαλύτερες των 60 ° είναι μικρή. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία επηρεάζει η ροή κυρίως μέσα στη μεγάλη ανακυκλοφορία και η επίδρασή της εξαρτάται και από την ισχύ της ακτινοβολίας και από τη γωνία πρόσπτωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kurata, K., Quan, Z. and Nunomura, O., 1991. Optimal shapes of parallel East-West oriented single span tunnels with respect to direct light transmissivity. *J. Agric. Eng. Res.* 48: 89-100
2. Tourdonnet, S., Meynard, J.M., Lafolie, F., Roger-Estrade, J., Lagier, J. and Seillotte, M., 2001. Non-uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. *Agronomie*, 21: 297-309

3. Graham, E.D., Dube, P.A. and Phenix, M., 1990. Measurement of natural irradiance in greenhouses: the effect of averaging period and number of sensors on measurement reliability. *Biotronics*, 19: 83-91
4. Wang, S. and Boulard T., 2000. Measurements and prediction of solar radiation distribution in full scale greenhouse tunnels. *Agronomie*, 20: 41-50
5. Trangmar, B.B., Yost, R.S. and Uehara G., 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agronomie*, 38: 45-91
6. Vougioukas, S. 2004. Multi-spectrum Global Illumination Computation For Greenhouse Applications. Proc. 2nd HAICTA Intl. Conference on Information Systems & Innovative Technologies in Agriculture, Food and Environment. Thessaloniki, Greece 18-20 March. Vol. 1, pp. 47-56.
7. Cohen, M. and Greenberg, D.1985. The Hemi-cube: A Radiosity Solution for Complex Environments. Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proc.), 22:31-40.
8. Campen, J.B. and Bot, G.P.A., 2003. Determination of Greenhouse-specific Aspects of Ventilation using Three-dimensional Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 84 (1): 69-77.
9. Mistriotis, A., Bot, G., P., A., Picuno, P. and Scarascia, Mugnozza, G., 1997 Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation with computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol*, 85, 317-328.
10. Bartzanas, T., Kittas, C. and Boulard, T., 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88 (4): 479-490.
11. Boulard T., Haxaire R., Lamrani M. A., Roy J. C., Jaffrin A., 1999. Characterization and Modelling of the Air Fluxes induced by Natural Ventilation in a Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74: 135-144.
12. Sapounas, A.A., Nikita – Martzopoulou, Ch., Martzopoulos, G., 2004, “Computational Modeling of Ventilation Process in a Naturally Ventilated Experimental Livestock Building”, International symposium of the CIGR, New Trends in farm Buildings, May 2004, Evora, Portugal
13. Mistriotis, A., Briassoulis D., 2002. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with openings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34: 191 – 205
14. Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2002. Numerical simulation of airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with a insect - proof screen on the openings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34: 207 – 221.
15. Briassoulis, D., 2004. Mechanical Design Requirements for Low Tunnel Biodegradable and Conventional Films. *Biosystems Engineering*, 87 (2): 209-223
16. Fluent, FLUENT, v.5, Fluent Europe Ltd, Sheffield, UK, 1998.
17. Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289

(209)

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

N. Tadj^{1,3}, Θ. Μπαρτζάνας², B .Draoui¹ και Κ. Κίττας^{2,3}

¹ University Center of Bechar Institute of Exact Sciences, BP 417 08000 Bechar, Algeria, tadjnacima@gmail.com

² Κέντρο Έρευνας, Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Αγροοικοσυστημάτων, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1^η Βιομηχανική Περιοχή, 38500 Βόλος, bartzanas@cereteth.gr

³ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερευνάται αριθμητικά, η θέρμανση του θερμοκηπίου με σύστημα επιδαπέδιων σωληνώσεων ή/και εξαναγκασμένου αερισμού, μεμονωμένα και σε συνδυασμένη λειτουργία όπου η συνισταμένη ροή είναι μια σύνθεση εξαναγκασμένης και φυσικής συναγωγής. Από τα αποτελέσματα εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση των συστημάτων θέρμανσης στην διαμόρφωση των επιθυμητών συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη ορθολογική διαχείριση των συστημάτων αλλά και της βελτίωσης του σχεδιασμού τους.

NUMERICAL SIMULATION OF GREENHOUSE HEATING

N. Tadj^{1,3}, Θ. Μπαρτζάνας², B .Draoui¹ και Κ. Κίττας^{2,3}

¹ University Center of Bechar Institute of Exact Sciences, BP 417 08000 Bechar, Algeria Sciences, BP 417 08000 Bechar, Algeria

² Centre for Research and Technology – Thessaly, Institute of Technology and Agricultural Ecosystems, Technological Park of Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, 38500 Volos, Greece, bartzanas@cereteth.gr

³ University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc., Dept. of Agriculture Crop Prod. & Rural Env., Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias, ckittas@uth.gr

ABSTRACT

Internal convective flows generated in a closed greenhouse by heating systems were numerically studied. Heat was provided by a network of heating pipes or an air heater and by their combination. Results show the influence of the selected heating system on greenhouse microclimate and they can be used in order to improve their design and management.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θέρμανση των θερμοκηπίων είναι απαραίτητη για ένα μεγάλο τμήμα του έτους στα θερμοκήπια της μεσογειακής λεκάνης προκειμένου να διατηρηθούν οι κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό τους σε επιθυμητά επίπεδα για τη βέλτιστη αύξηση και ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Τα περισσότερα θερμοκήπια στην Ελλάδα χρησιμοποιούν ως σύστημα θέρμανσης είτε τους επιδαπέδιους σωλήνες μέσω των οποίων με την ανακυκλοφορία ζεστού νερού θερμαίνεται το περιβάλλον του θερμοκηπίου, είτε αερόθερμα, είτε το συνδυασμό των δύο προηγούμενων συστημάτων θέρμανσης. Ο σχεδιασμός η θέση αλλά και ο τρόπος διαχείρισης των συστημάτων θέρμανσης καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το μικροκλίμα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Η διαχείριση των συστημάτων γίνεται είτε εμπειρικά από τον παραγωγό είτε στην καλύτερη των περιπτώσεων με τη βοήθεια απλών λογισμικών προσομοίωσης τα οποία όμως υιοθετούν την παραδοχή του ενιαίου μικροκλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Perfectly-Stirred-Tank, approach), [1]. Στην πραγματικότητα όμως καμία από τις κλιματικές παραμέτρους στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δεν έχει ενιαία τιμή, αλλά αντιθέτως μεταβάλλονται ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, την γεωμετρία του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια. Είναι γνωστό ότι ακόμη και σε ένα καλά σχεδιασμένο θερμοκήπιο παρατηρούνται μεταβολές στην κατανομή της θερμοκρασίας έως και 5 °C [2]. Η γνώση της κατανομής του μικροκλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων είναι πλέον απαραίτητη για την παραγωγή προϊόντων ποιότητας με μειωμένες εισροές.

Οι εργασίες που έχουν γίνει σχετικά με την επίδραση των συστημάτων θέρμανσης, εξετάζουν κυρίως την κατανομή της θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου και κυρίως πως αυτή κατανέμεται στο περιβάλλον των φυτών, ενώ αρκετές είναι αυτές οι οποίες συγκρίνουν τα δύο κυριότερα είδη θέρμανσης του θερμοκηπίου (επιδαπέδιους σωλήνες και αερόθερμα), [3-5]. Η θέση των σωλήνων θέρμανσης εξετάστηκε από τον Popovski [5], ο οποίος διαπίστωσε ότι η τοποθέτηση των σωλήνων σε χαμηλά επίπεδα κοντά στην περιοχή των φυτών πλεονεκτεί. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Teitel και Tanny [6], οι οποίοι επίσης προτείνουν την τοποθέτηση των σωλήνων κοντά στο έδαφος ή στο μέσο του επιπέδου των φυτών. Η επίδραση των σωλήνων θέρμανσης στην κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου διερευνήθηκε πειραματικά από τους Kempkes et al. [7] και Kittas et al. [8], οι οποίοι βρήκαν σημαντικές διαφορές στην κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου το οποίο θερμαίνεται από επιδαπέδιους σωλήνες. Οι Boulard et al. [9] διερεύνησαν πειραματικά τις ροές αέρα και θερμοκρασίας, που δημιουργούνται λόγω των φαινομένων άνωσης και σημείωσαν ότι οι μεγαλύτερες διαβαθμίσεις στις τιμές της θερμοκρασίας παρατηρούνται κοντά στο έδαφος και την οροφή του θερμοκηπίου, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας παρέμενε σταθερή και αμετάβλητη στον υπόλοιπο όγκο του θερμοκηπίου. Σε μια σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων (επιδαπέδιοι σωλήνες και αερόθερμο) οι Teitel et al. [10] καταλήγουν ότι με τη χρήση του αερόθερμου η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος αέρα, ενώ με τους επιδαπέδιους σωλήνες ήταν υψηλότερη. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Bartzanas et al. [11], οι οποίοι προσδιόρισαν και τον ολικό συντελεστή απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου για τα δύο συστήματα θέρμανσης και ο οποίος ήταν 19% μεγαλύτερος στην περίπτωση που το θερμοκήπιο θερμαινόταν με το συνδυασμό των επιδαπέδιων σωλήνων και του αερόθερμου, από ότι αν θερμαινόταν μόνο με επιδαπέδιους σωλήνες. Τέλος οι Meneses και Montero [12] ανέφεραν σημαντικές θερμοβαθμίδες κατά μήκος του θερμοκηπίου που θερμαινόταν μόνο με αερόθερμο.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, η πρόσφατη πρόοδος στην η εισαγωγή των μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στον τομέα των αγροτικών κατασκευών [13-16] επέτρεψε την διερεύνηση της ετερογένειας του θερμοκηπιακού μικροκλίματος ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό και έδωσε στους ερευνητές την δυνατότητα εξέτασης διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Γνωρίζοντας την τιμή αλλά και την κατανομή στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αυτών των μεταβλητών μπορούμε να διαχειριστούμε τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου με τρόπο που να μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της κατανομής του θερμοκηπιακού μικροκλίματος σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τομάτας, με τη χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων, το οποίο θερμαίνεται:

- (α) μόνο με επιδαπέδιους σωλήνες
- (β) μόνο με αερόθερμο
- (γ) με το συνδυασμό επιδαπέδιων σωλήνων και αερόθερμου

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Το θερμοκήπιο για το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις ήταν ένα από τα πειραματικά θερμοκήπια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πρόκειται για ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με μήκος 20 m, πλάτος 8 m, ύψος ορθοστάτη 2.4 m και ύψος κορφιά 4.1 m. Η θέρμανση του θερμοκηπίου γινόταν από ένα δίκτυο σωληνώσεων ζεστού νερού ενώ συμπληρωματικά υπήρχε και αξονικό αερόθερμο, τοποθετημένο σε απόσταση 2.5 m από το έδαφος του θερμοκηπίου. Το δίκτυο των σωλήνων ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 10 cm από την επιφάνεια του εδάφους και αποτελούνταν από μια γραμμή προσαγωγής ζεστού νερού και μια γραμμή επιστροφής για κάθε σειρά της καλλιέργειας. Η επιθυμητή θερμοκρασία ήταν 21 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 15 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπήρχε καλλιέργεια τομάτας σε υπόστρωμα περλίτη. Το ύψος της καλλιέργειας που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις ήταν 1.5 m.

2.2. Το αριθμητικό προσομοίωμα

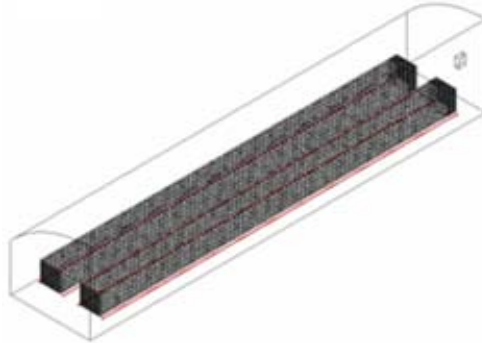
Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, CFX-5, ο οποίος προσαρμόστηκε κατάλληλα για είναι λειτουργικός σε περιβάλλον θερμοκηπίου. Το CFX-5 [17] είναι ένα από τα πλέον εξελιγμένα προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Βασίζεται στην ευελιξία των μη δομημένων πλεγμάτων και δίνει τη δυνατότητα αποτύπωσης της γεωμετρίας και κατασκευής των πλεγμάτων σε ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον. Το πρόγραμμα εφαρμόζοντας μέθοδο αυτόματης προσαρμογής του πλέγματος στις περιοχές μέγιστων μεταβολών (automated grid adaptation) βελτιστοποιεί την ποιότητα του πλέγματος και συντομεύει τη συνολική διαδικασία επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων (Σχήμα 1).

Χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο ενώ έγινε και υιοθέτηση των συμμετρικών συνθηκών (Σχήμα 1). Η επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη ροή, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, και η θερμοκρασία, ενσωματώνονται στις αντίστοιχες οριακές συνθήκες, ενώ η καλλιέργεια στο εσωτερικό του θερμοκηπίου προσομοιώθηκε ως πορώδες υλικό. Η τυρβώδης δυναμική περιγράφεται με το $k - \epsilon$ προσομοίωμα τύρβης [18] ενώ η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας έγινε υιοθετώντας το μοντέλο Boussinesq [17].

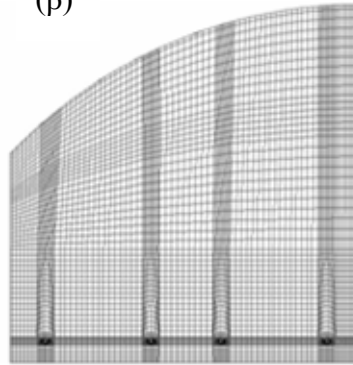
Για τον καθορισμό ρεαλιστικών οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν τιμές από πειραματικές μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο θερμοκήπιο με τον ίδιο

εξοπλισμό [19]. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο των παραμέτρων για ένα χρονικό διάστημα δέκα ημερών (πίνακας 1).

(α)



(β)



Σχήμα 1. Γεωμετρία του τρισδιάστατου υπολογιστικού πεδίου (α) και λεπτομέρεια πλέγματος του υπολογιστικού πεδίου (β)

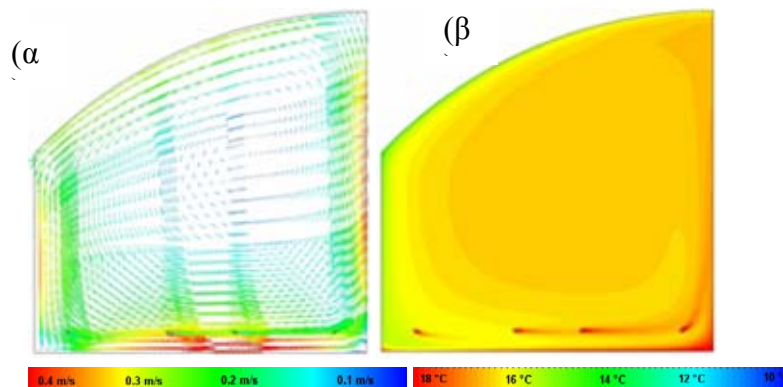
Πίνακας 1. Οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

Παράμετρος	Τιμή
Θερμοκρασία	
Οροφής	10, °C
Εδάφους	22, °C
Σωλήνων θέρμανσης	60, °C
Αέρα κατά την έξοδο του από το αερόθερμο	52, °C
Ταχύτητα αέρα κατά την έξοδο του από το αερόθερμο	3, m/s
Πυκνότητα αέρα	1,185, kg/m ³
Ειδική θερμότητα αέρα	1004,4, J/kg K
Θερμική αγωγιμότητα αέρα	0,0261, W/m ² K
Διαπερατότητα καλλιέργειας	0,395
Συντελεστής απώλειας ορμής καλλιέργειας	0,2

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε ένα θερμαινόμενο θερμοκήπιο η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του προκαλείται λόγω των φαινομένων άνωσης αποτέλεσμα της διαφοράς της πυκνότητας του αέρα λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Το Σχήμα 2 (α) παρουσιάζει τα διανύσματα της ταχύτητας του αέρα σε θερμοκήπιο το οποίο θερμαίνεται μόνο με επιδαπέδιους σωλήνες. Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 2 (α), ο αέρας θερμαινόμενος από τους επιδαπέδιους σωλήνες οδηγείται προς την οροφή του θερμοκηπίου και στην συνέχεια μέσω των πλευρικών τοιχωμάτων τα οποία βρίσκονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτόν οδηγείται ξανά προς το έδαφος του θερμοκηπίου διαγράφοντας δύο συμμετρικούς βρόγχους. Λόγω των συμμετρικών συνθηκών που υιοθετήθηκαν στις προσομοιώσεις παρουσιάζεται η τομή του μισού θερμοκηπίου στην οποία φαίνεται ο ένας από τους δύο βρόγχους. Το Σχήμα 2 (β) παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας για το ίδιο σύστημα θέρμανσης όπου και φαίνεται πως η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το επίπεδο που είναι οι σωλήνες θέρμανσης, παραμένει σταθερή στο μεγαλύτερο τμήμα του θερμοκηπίου για να μειωθεί εκ νέου και πάλι πριν την οροφή του θερμοκηπίου. Σε ανάλογα συμπεράσματα για την

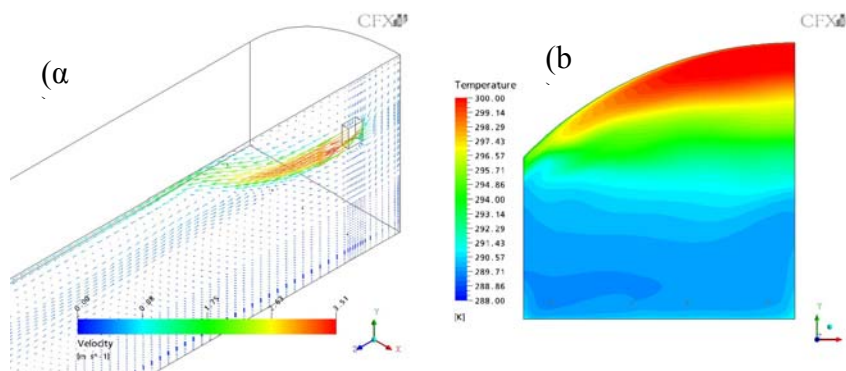
κατανομή της θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα σε θερμοκήπιο που θερμαίνεται από το έδαφος είχαν καταλήξει και οι Boulard et al. [9].



Σχήμα 2. Κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας του αέρα (α) και της θερμοκρασίας του αέρα (β) σε σε κάθετο επίπεδο στο μέσο του θερμοκηπίου θερμαινόμενο με σύστημα επιδαπέδιων σωλήνων

Στην περίπτωση που η θέρμανση του θερμοκηπίου προέρχεται μόνο από το αερόθερμο η κατανομή των παραμέτρων του μικροκλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τροποποιείται ποιοτικά και ποσοτικά. Το ζεστό ρεύμα αέρα που παράγεται από το αερόθερμο κοντά στην οροφή του θερμοκηπίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας του κοντά στην οροφή του θερμοκηπίου. Το ζεστό ρεύμα από το αερόθερμο κατευθύνεται προς το απέναντι άκρο του θερμοκηπίου, όπου συναντώντας το ψυχρό τοίχωμα του θερμοκηπίου οδηγείται προς την επιφάνεια των φυτών. Τμήμα του ζεστού ρεύματος του αέρα, οδηγείται σταδιακά προς το έδαφος του θερμοκηπίου κατά την πορεία της κίνησης του, καθώς η θερμοκρασία που μειώνεται όπως απομακρυνόμαστε από το σημείο που βρίσκεται το αερόθερμο και έτσι ο ψυχρός αέρας υποχωρεί προς το έδαφος του θερμοκηπίου. Στο Σχήμα 3 (α) παρουσιάζεται σε οριζόντια τομή στο μέσο του θερμοκηπίου η κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας του αέρα και στο Σχήμα 3 (β) η κατανομή της θερμοκρασίας του στο ίδιο πλάνο.

Στην περίπτωση που το θερμοκήπιο θερμαίνεται από το συνδυασμό των επιδαπέδιων σωλήνων και του αερόθερμου η κατανομή των παραμέτρων του κλίματος είναι πιο ομοιόμορφη καθώς το ζεστό ρεύμα αέρα που παράγεται από το αερόθερμο, κατά την κάθοδο του προς τα κατώτερα στρώματα του θερμοκηπίου (φυτά-έδαφος) λόγω της σταδιακής μείωσης του θερμοκρασίας, συναντά το ζεστό ρεύμα αέρα που οδηγείται προς την οροφή του θερμοκηπίου από το σύστημα των επιδαπέδιων σωλήνων.



Σχήμα 3. Κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας του αέρα (α) και της θερμοκρασίας του αέρα (β) σε οριζόντιο επίπεδο στο μέσο του θερμοκηπίου θερμαινόμενου με σύστημα επιδαπέδιων σωλήνων και αερόθερμου

Η ταχύτητα του αέρα κοντά στην περιοχή της καλλιέργειας αλλά και η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας – αέρα είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους του θερμοκηπιακού μικροκλίματος, αφού καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό, τις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας μεταξύ της καλλιέργειας και του περιβάλλοντος αέρα.

Ακόμη και στις περιπτώσεις που το θερμοκήπιο είναι κλειστό (δηλαδή όταν θερμαίνεται), η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του είναι επιθυμητή ώστε να υπάρχει μια ικανοποιητική μείξη του εσωτερικού αέρα. Το ρεύμα αέρα το οποίο προερχόταν από το αερόθερμο αύξησε την ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η μέση ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ήταν 0.14 m s^{-1} με τη συνδυασμένη χρήση του αερόθερμου και των επιδαπέδιων σωλήνων και μειωνόταν σε 0.08 m s^{-1} με τη χρήση μόνο των επιδαπέδιων σωλήνων. Ενδεικτικά αναφέρετε πως για μια ταχύτητα του αέρα 0.14 m s^{-1} η αεροδυναμική αντίσταση της καλλιέργειας είναι 750 s m^{-1} ενώ για ταχύτητα 0.08 m s^{-1} είναι 1200 s m^{-1} . Μία τέτοια αύξηση στην αεροδυναμική αντίσταση της καλλιέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από την καλλιέργεια στον αέρα στο ίδιο ποσοστό. Φυσικά σε άλλα επίπεδα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου η ταχύτητα του αέρα μεταβαλλόταν ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό. Έτσι κοντά στην οροφή του θερμοκηπίου η ταχύτητα του αέρα αποκτούσε μεγαλύτερες τιμές στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνταν και το αερόθερμο.

Όσο αφορά τη μεταβολή της θερμοκρασίας καλλιέργειας αέρα, η μέση τιμή αυτής είχε θετικές τιμές (καλλιέργεια θερμότερη του περιβάλλοντος αέρα) όταν η θέρμανση προερχόταν μόνο από τους επιδαπέδιους σωλήνες ($0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ενώ όταν λειτουργούσε και το αερόθερμο συγχρόνως με τους επιδαπέδιους σωλήνες η μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας ήταν αρνητική (καλλιέργεια ψυχρότερη του περιβάλλοντος αέρα) $-0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Στην περίπτωση που λειτουργούσε μόνο το αερόθερμο η μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας – αέρα ήταν $-1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμότητα η οποία παρέχεται από τους επιδαπέδιους σωλήνες μεταφέρεται στην καλλιέργεια αλλά και στον αέρα του θερμοκηπίου τόσο με συναγωγή όσο και με ακτινοβολία. Από την παρεχόμενη θερμότητα, μισή συνήθως μεταφέρεται με συναγωγή και μισή με ακτινοβολία. Η θέρμανση όπως είναι φυσικό είναι περισσότερο αποτελεσματική μέσω ακτινοβολίας παρά με συναγωγή και συνεπώς τα φυτά διατηρούν μια θερμοκρασία ανάλογη με αυτή του περιβάλλοντος αέρα. Όταν όμως λειτουργεί και το αερόθερμο, η θερμότητα που παρέχεται στην καλλιέργεια μέσω των επιδαπέδιων σωλήνων και κατά συνέπεια μέσω ακτινοβολίας μειώνεται, ενώ αντίθετα αυξάνεται σημαντικά το ποσό θερμότητας που

μεταφέρεται με συναγωγή, με αποτέλεσμα η καλλιέργεια να είναι πάντα ψυχρότερη από τον περιβάλλοντα αέρα.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την ορθολογική ρύθμιση του μικροκλίματος των θερμοκηπίων είναι η ετερογένεια στην κατανομή των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του. Η ομοιογένεια της κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου εξετάστηκε με τη βοήθεια του λόγου της τυπικής απόκλισης της διαφοράς θερμοκρασίας κάθε τιμής από τη μέση τιμή της θερμοκρασίας $\sigma(\Delta T)$ προς τη μέση τιμή ΔT . Μικρότερες τιμές του ανωτέρω λόγου οδηγούν σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του εξεταζόμενου δείγματος. Όταν θέρμανση του θερμοκηπίου προερχόταν μόνο από επιδαπέδιους σωλήνες η τιμή του ανωτέρω λόγου ήταν 0.65 ενώ, αυξανόταν σε 0.87 με τη χρήση μόνο του αερόθερμου και μειωνόταν σε 0.34 με το συνδυασμό των επιδαπέδιων σωλήνων και του αερόθερμου. Ανάλογη συμπεριφορά ως προς την ομοιογένεια της κατανομής της παρουσιάζει και η ταχύτητα του αέρα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων διερευνήθηκε η επίδραση τριών διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης στις κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τομάτας. Η επιλογή του συστήματος θέρμανσης επηρεάζει ποιοτικά και ποσοτικά την κατανομή της θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο συνδυασμός επιδαπέδιων σωλήνων και αερόθερμου οδηγεί σε πιο ομοιογενείς συνθήκες αλλά παράλληλα αυξάνει και την ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η καλλιέργεια ήταν θερμότερη του περιβάλλοντος αέρα με τη χρησιμοποίηση μόνο των επιδαπέδιων σωλήνων θέρμανσης και ψυχρότερη αυτού όταν χρησιμοποιούνται και το αερόθερμο ή μόνο το αερόθερμο για τη θέρμανση του θερμοκηπίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Udink ten Cate, A.J., 1980. Remarks on greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*, 106: 43-46
- 2 Bloemhard, C., Esmeijer, M. and Van der Meer M., 1998. Practical implementation of a system to remove climate differences in greenhouses. PBG Naaldwijk ISSN 1385-3015
- 3 Mavrogianopoulos, G., Choustoulakis, P. and Kyritsis S., 1993. Tomato production in heated and unheated greenhouses. *Agricoltura Mediterranea*: 123:30-34.
- 4 Baille, A. and von Elsner B., 1988. Low temperature heating systems. In: Energy conservation and renewable energies for greenhouse heating, (von Zabelitz, Chr, ed.). *European Cooperative networks a rural energy, CNRE guideline* No. 2: 149-167.
- 5 Popovski, K., 1986. Location of heating installations in greenhouses for low temperature heating fluids. In: Industrial thermal effluents for greenhouse heating. Cooperative networks an rural energy, *CNRE guideline* No.15:51-55. Proceedings of CNRE Workshop, Dublin, Ireland. 17-19 September.
- 6 Teitel, M. and Tanny J., 1998. Radiative Heat Transfer from Heating Tubes in a Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69:185-188.
- 7 Kempkes, F.L.K, Van de Braak, N.J. and Bakker J.C., 2000. Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75:57-64.

- 8 Kittas, C., Katsoulas, N. and Baille A., 2003. Influence of Aluminised Thermal Screens on Greenhouse Microclimate and Night Transpiration. *Transactions of the ASAE*, 46 (6): 1653- 1663
- 9 Boulard, T., Haxaire, R., Lamrani, M.A., Roy, J.C. and Jaffrin, A., 1999. Characterization and modelling of the air fluxes intuced by natural ventilation in a greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74: 135-144.
- 10 Teitel, M., Segal, I., Shklyar, A. and Barak, M., 1999. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72: 259-273.
- 11 Bartzanas, T., Tchamitchian, M. and Kittas, C., 2005. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption. *Biosystems Engineering*, 91 (4), 487-499
- 12 Meneses, J. F. and Montero, A A., 1990. Ducted air heating systems in greenhouses: experimental results. *Acta Horticulturae*, 263: 285-292
- 13 Mistriotis, A., Bot, G. P. A., Picuno, P., Scarascia Mugnozza, G., 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation with computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85: 317-328.
- 14 Reichrath, S. and Davies, T. W, 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomie*, 22: 3-19.
- 15 Ould Khaoua, S.A., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T. and Chasseriaux, G., 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering* 95: 83–98
- 16 Kittas, C. and Bartzanas, T., 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations *Building and Environment*, 42 (10): 3774-3784
- 17 CFX-5, Users Manual, CFX-International, 2001
- 18 Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289
- 19 Μπαρτζάνας, Θ., 2004. Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά θερμοκήπια. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 286 σελ.

(210)

ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Θ. Μπαρτζάνας¹ και Κ. Κίττας^{1,2}

¹ Κέντρο Έρευνας, Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Αγροοικοσυστημάτων, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1^η Βιομηχανική Περιοχή, 38500 Βόλος, bartzanas@cereteth.gr

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην την εργασία αυτή παρουσιάζεται, και επιβεβαιώνεται πειραματικά, ένα απλό προσομοίωμα εκτίμησης της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία στο εσωτερικό θερμοκηπίου, η χρήση του οποίου επιτρέπει τη ρύθμιση της υγρασίας έτσι ώστε να αποτρέπεται η δημιουργία συμπυκνώσεων ενώ παράλληλα υπολογίζεται και η απαιτούμενη πρόσθετη ενέργεια που θα απαιτηθεί. Το προτεινόμενο προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ορθολογική διαχείριση της υγρασίας σε θερμοκήπια με στόχο την παραγωγή προϊόντων ποιότητας με μειωμένες εισροές

RATIONAL HUMIDITY MANAGEMENT IN GREENHOUSES USING SIMULTANEOUSLY HEATING AND VENTILATION SYSTEMS

T. Bartzanas¹, and C. Kittas^{1,2}

¹ Centre for Research and Technology – Thessaly, Institute of Technology and Agricultural Ecosystems, Technological Park of Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, 38500 Volos, Greece, bartzanas@cereteth.gr

² University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc., Dept. of Agriculture Crop Prod. & Rural Env., Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias, ckittas@uth.gr

ABSTRACT

In this paper a simple model for the rational management of greenhouse humidity was presented and experimentally validated. With the proposed model air humidity can be adjusted in such levels in order to avoid condensation of air and in addition the energy needed for that action was also calculated. The model can be used for optimum greenhouse climate control in light of integrated production of greenhouse crops.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί θερμοκηπιακών καλλιεργειών, κατά τη διάρκεια του χειμώνα κυρίως, είναι η μείωση των υψηλών επιπέδων υγρασίας. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας επηρεάζουν την αύξηση και ανάπτυξη των καλλιεργειών κυρίως λόγω της δημιουργίας ευνοϊκών συνθηκών για την εμφάνιση και ταχεία εξάπλωση μυκητολογικών ασθενειών [1] καθώς οι περισσότεροι μύκητες απαιτούν μια υγρή επιφάνεια να περιβάλει τα σπόρια τους, έτσι ώστε αυτά να αναπτυχθούν. Η υψηλή υγρασία μπορεί να προκαλέσει μείωση της διαπνοής και φυσιολογικές ανωμαλίες όπως νεκρώσεις φύλλων και τροφопενίες ασβεστίου [2], ενώ επηρεάζει σημαντικά και την ποιότητα και εμπορική αξία των προϊόντων μετά τη συγκομιδή [3]. Έτσι, το πρόβλημα της ορθολογικής διαχείρισης υγρασίας σε θερμοκήπιο αποτέλεσε και εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητών.

Σχετικά με την αφύγρανση των θερμοκηπίων, έχουν γίνει εργασίες τόσο για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της υγρασίας με τη χρήση του κλασικού συστήματος θέρμανσης- αερισμού, όσο και για την ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων αφύγρανσης με διαφορετική αρχή λειτουργίας. Οι εργασίες βελτιστοποίησης της διαχείρισης του συστήματος αφορούσαν κυρίως τη μοντελοποίηση του ισοζυγίου υδρατμών του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια τον υπολογισμό των βέλτιστων ορίων υγρασίας [4-7]. Οι εργασίες οι οποίες αναφέρονται στην εφαρμογή κάποιου συστήματος διαφορετικού από το κλασικό σύστημα αφύγρανσης αναφέρονται κυρίως στην αφύγρανση: α) με τη χρησιμοποίηση κάποιου υγροσκοπικού υλικού, [8-9], β) με χρήση αντλιών θερμότητας [10-12] και γ) την εξαναγκασμένη εναλλαγή του αέρα με τη βοήθεια συστήματος ανεμιστήρων [6].

Εκτός του συνδυασμένου συστήματος αφύγρανσης (θέρμανση και αερισμός), τα υπόλοιπα συστήματα δε βρήκαν πρακτική εφαρμογή στο χώρο των θερμοκηπίων λόγω διαφόρων παραμέτρων, όπως υψηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη ετερογένεια στις κατανομές θερμοκρασίας και υγρασίας, έλλειψη αποτελεσματικότητας, υψηλές ταχύτητες του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω του μεγάλου μεγέθους των αφυγραντικών μονάδων. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έγινε κάποια προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος αφύγρανσης με χρήση αντλιών θερμότητας χρησιμοποιώντας και αριθμητικές μεθόδους [13-14].

Σήμερα, το πρόβλημα της υψηλής υγραμετρίας εξακολουθεί να αντιμετωπίζεται κυρίως με συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού. Η επιλογή ενός κατάλληλου δείκτη, με τον οποίο θα ενεργοποιείται το σύστημα ελέγχου της υγρασίας με τη συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού, είναι όχι μόνο κρίσιμη αλλά και δύσκολη. Η επιλογή της πίεσης των υδρατμών του αέρα μπορεί να είναι ένας τέτοιος δείκτης, αφού καθορίζει σε γενικές γραμμές το υδατικό ισοζύγιο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και επιβεβαιώνεται πειραματικά ένα προσομοίωμα υπολογισμού της πίεσης των υδρατμών του αέρα το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε λογισμικά ελέγχου του μικροκλίματος θερμοκηπίου και να οδηγήσει σε ορθολογική διαχείριση της υψηλής υγρασίας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Οι πειραματικές μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίου του Νομού Μαγνησίας. Το πειραματικό θερμοκήπιο ήταν ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, με σκελετό από γαλβανισμένο

χάλυβα και κάλυψη με απλό πολυαιθυλένιο και ήταν προσανατολισμένο 36° δεξιόστροφα από τη διεύθυνση Βορράς-Νότος. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν καλυμμένο με απλό πολυαιθυλένιο έτσι ώστε να αποτρέπεται η εμφάνιση ζιζανίων αλλά και η εξάτμιση από το έδαφος. Το θερμοκήπιο είχε μήκος 20 m και πλάτος 8 m καταλαμβάνοντας συνολικά 160 m². Το ύψος του ορθοστάτη ήταν 2.4 m και το ύψος του κορφιά 4.1 m. Το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με συνεχή πλαϊνά ανοίγματα αερισμού διαστάσεων 0.9 m x 15 m. Το ποσοστό των ανοιγμάτων αερισμού (ως προς το καλυμμένο έδαφος) ήταν 16.87 %.

Η καλλιέργεια ήταν υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (cv. Beladonna) σε υπόστρωμα περλίτη, με διαστάσεις κάθε σάκου περλίτη 1 m και τοποθετημένοι σε απόσταση 0.5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε δύο διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης 0.33 m επί της γραμμής και 0.75 m επί των γραμμών, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο μία πυκνότητα φυτών 2.5 φυτά / m² εδάφους. Η δόση και η συχνότητα άρδευσης καθώς και η ποιότητα του αρδευόμενου διαλύματος ελέγχονταν με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου και αναμείξεως των διαλυμάτων μέσω H/Y. Το σύστημα ήταν εξοπλισμένο με μικροελεγκτή που ρύθμιζε τις συγκεντρώσεις και τα χαρακτηριστικά του διαλύματος προτού αυτό να διοχετευτεί στα φυτά μέσω των σταλακτών.

Η θέρμανση του θερμοκηπίου γινόταν από ένα δίκτυο σωληνώσεων ζεστού νερού ενώ συμπληρωματικά υπήρχε και αξονικό αερόθερμο, τοποθετημένο σε απόσταση 2.5 m από το έδαφος του θερμοκηπίου. Το δίκτυο των σωλήνων ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 10 cm 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. Το σύστημα θέρμανσης ελεγχόταν μέσω του κεντρικού ελεγκτή του 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 ήταν 21 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 15 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας.

2.2. Μετρήσεις

Οι πειραματικές μετρήσεις αφορούσαν:

(α) το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου στο οποίο καταγραφόταν: η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου

(β) το εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου στο οποίο καταγραφόταν: η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, η θερμοκρασία τεσσάρων (4) φύλλων από το μέσο όρο των οποίων εξαγόταν η θερμοκρασία της καλλιέργειας, η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος της οροφής, η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, η παροχή ενέργειας από το αερόθερμο και από τους επιδαπέδιους σωλήνες.

(γ) τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου, ο οποίος έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της φθίνουσας συγκέντρωσης ενός αερίου δείκτη.

Για τη συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Περισσότερες πληροφορίες για τις μετρήσεις μπορούν να δίνονται από τον Μπαρτζάνα [15].

2.3. Προσομοίωμα προσδιορισμού υγρασίας

Η περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση:

$$e_i = \frac{\gamma \alpha R_i + h_t e_{is} + h_r e_{rs} + h_v e_o}{h_t + h_r + h_v} \quad (1)$$

όπου: γ είναι η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), α είναι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διαπνοή, R_i η ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (W m^{-2}), h_t , h_r και h_v συντελεστές μεταφοράς υδρατμών λόγω διαπνοής, στην επιφάνεια του καλύμματος και λόγω αερισμού αντίστοιχα ($\text{W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$), e_{is} , e_{rs} και e_o η πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, στην επιφάνεια του καλύμματος και η πίεση υδρατμών του εξωτερικού αέρα αντίστοιχα (kPa).

Η εξίσωση (1) δείχνει τη σχέση της μερικής πίεσης των υδρατμών του εσωτερικού αέρα, άρα και επομένως της υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου από τη διαπνοή, τη ροή αερισμού και το ρυθμό συμπυκνώσεων στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος της οροφής. Εάν ο έλεγχος της υγρασίας γίνεται με αερισμό και θέρμανση ταυτόχρονα, τότε η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω αερισμού (Δh_v) που θα χρειαστεί για να επιτύχουμε το επιθυμητό set-point πίεσης υδρατμών (e_s) θα είναι:

$$\Delta h_v = (h_t + h_r + h_v) \frac{(e_i - e_s)}{(e_s - e_o)} \quad (2)$$

όπου: Δh_v η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς υδρατμών λόγω αερισμού ($\text{W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$), e_i και e_s η πίεση των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και η επιθυμητή πίεση των υδρατμών αντίστοιχα (kPa).

Έτσι, εάν μια νέα πίεση υδρατμών επιτευχθεί, λόγω της ταυτόχρονης χρήσης του αερισμού και της θέρμανσης, τότε η επιπλέον ενέργεια ΔH_v (W m^{-2}) που απαιτήθηκε θα είναι:

$$\Delta H_v = h_v \frac{(e_s - e_i)}{\gamma} + \Delta h_v (T_i - T_o + \frac{e_s - e_o}{\gamma}) \quad (3)$$

όπου: ΔH_v , η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται (W m^{-2}), T_i και T_o οι θερμοκρασίες του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ($^\circ\text{C}$)

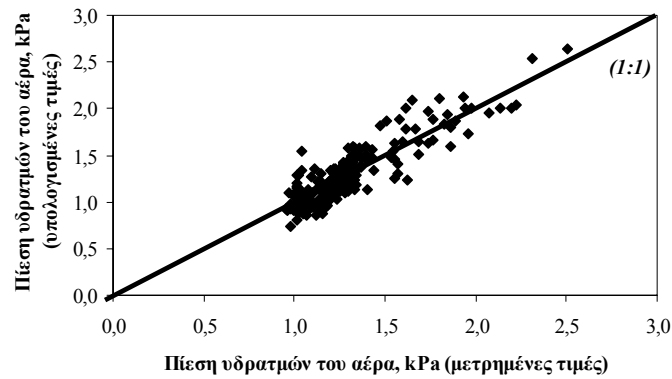
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε για το χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας. Η μέση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εξωτερικού αέρα καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα ήταν $15.46 ^\circ\text{C}$ και η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας ήταν 71%, ενώ η μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα ήταν 0.56 kPa.

Πίνακας 1. Μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εξωτερικού αέρα καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου

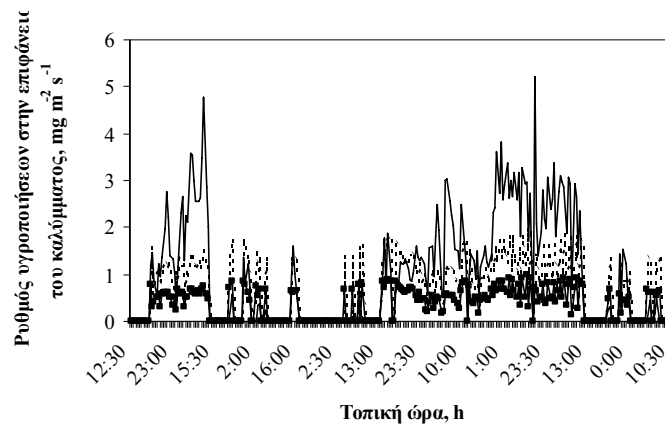
	Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη
Θερμοκρασία, $^\circ\text{C}$	6.46	-2.45	19.8
Σχετική υγρασία, %	74.7	30.5	96.1

Η τιμή της πίεσης των υδρατμών υπολογίστηκε για το χρονικό διάστημα της μίας εβδομάδας, με τη βοήθεια της εξίσωσης 1. Η σύγκριση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών παρουσιάζεται στο *Σχήμα 1*. Η εξίσωση που περιγράφει τη συσχέτιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών είναι της μορφής $y = 1.08 x$, με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.81$.



Σχήμα 1. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της μερικής πίεσης των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Στο *Σχήμα 2* παρουσιάζεται ο ρυθμός υγροποιήσεων στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος της οροφής για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: α) χωρίς έλεγχο της υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, β) καθορισμός επιθυμητού ορίου πίεσης υδρατμών 100 Pa μεγαλύτερο από την τιμή του ελλείμματος κορεσμού στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος και γ) καθορισμός επιθυμητού ορίου πίεσης υδρατμών 50 Pa, μεγαλύτερο από την τιμή του ελλείμματος κορεσμού στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος. Ο μέσος όρος του ρυθμού υγροποιήσεων στην επιφάνεια του καλύμματος ήταν $1 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ χωρίς καμία διαχείριση της υγρασίας (α) και μειωνόταν στα $0.68 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ θέτοντας ως επιθυμητή τιμή της πίεσης των υδρατμών την τιμή των 100 Pa, που είναι μεγαλύτερη από αυτή της πίεσης των υδρατμών στον κορεσμό του καλύμματος. Τέλος μειωνόταν στα $0.34 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ θέτοντας ως επιθυμητή τιμή της πίεσης των υδρατμών την τιμή των 50 Pa, που ήταν μεγαλύτερη από αυτή της πίεσης των υδρατμών στον κορεσμό του καλύμματος. Θέτοντας βέβαια ως επιθυμητή τιμή πίεσης των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου την πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος, ο ρυθμός υγροποιήσεων ήταν μηδενικός.

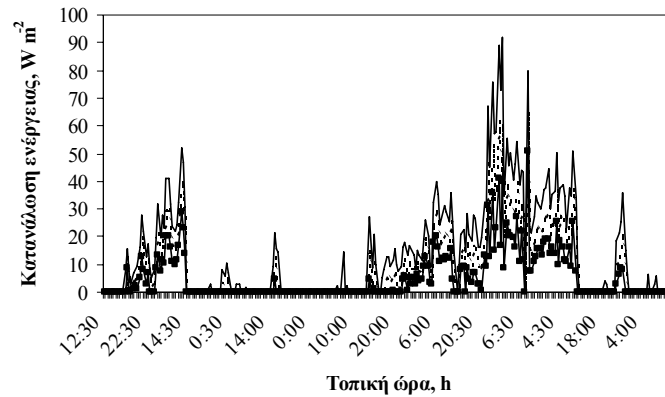


Σχήμα 2. Ρυθμός υγροποιήσεων στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος οροφής κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. — Χωρίς καθορισμό ορίου πίεσης υδρατμών, — — — πίεση υδρατμών 50 Pa μεγαλύτερη από την πίεση υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος, - - - - πίεση υδρατμών 100 Pa μεγαλύτερη από την πίεση υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος

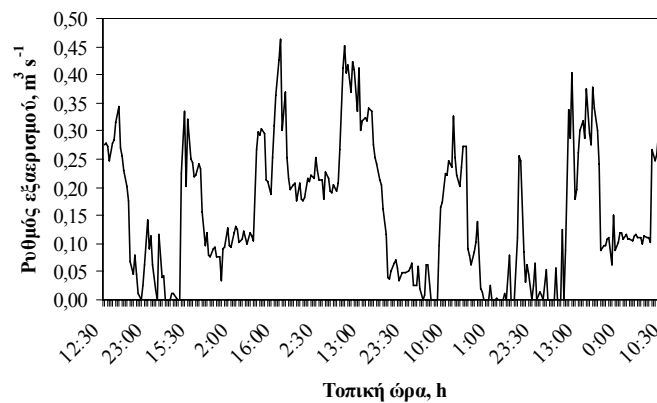
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η επιπρόσθετη ενέργεια που πρέπει να καταναλωθεί προκειμένου η πίεση των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να είναι: α) ίση με την πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος, β) 50 Pa μεγαλύτερη από την πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος και γ) 100 Pa μεγαλύτερη από την πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος. Για την πρώτη περίπτωση, η οποία οδηγεί σε μηδενισμό των υγροποιήσεων στην επιφάνεια του καλύμματος, η πρόσθετη ισχύς που θα πρέπει να καταναλωθεί σε ολόκληρο το διάστημα της εξεταζόμενης περιόδου είναι 0.65 MW. Για τη δεύτερη περίπτωση η πρόσθετη ενέργεια μειώνεται στα 0.43 MW και για την τρίτη στα 0.25 MW. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε από το σύστημα θέρμανσης κατά την εξεταζόμενη περίοδο, για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα, ήταν 1.79 MW.

Τέλος, στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ο απαιτούμενος ρυθμός αερισμού προκειμένου η πίεση των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να είναι ίση με την πίεση των υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος.

Στη συγκεκριμένη εργασία ως όριο υγρασίας επιλέχθηκε η πίεση των υδρατμών στον κορεσμό της επιφάνειας του καλύμματος οροφής, θεωρώντας πως σε ένα θερμοκήπιο το οποίο θερμαίνεται με σύστημα επιδαπέδιων σωλήνων η θερμοκρασία της καλλιέργειας θα είναι κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντος αέρα και επομένως η πιθανότητα υγροποιήσεων απευθείας στην επιφάνεια των φυτών πρέπει να αποκλείσθει, ενώ αντίθετως υγροποιήσεις μπορούν να συμβούν στην επιφάνεια του καλύμματος της οροφής. Η επιλογή ενός τέτοιου κριτηρίου οδηγεί σε σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας μηδενίζει όμως τις υγροποιήσεις στην επιφάνεια του καλύμματος. Αυτό σημαίνει πως περιορίζεται, σε σημαντικό βαθμό, η εμφάνιση μυκητολογικών ασθενειών και κατά συνέπεια η χρήση φυτοπροστατευτικών ουσιών και συνεπώς οδηγούμαστε σε μια παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας



Σχήμα 3. Κατανάλωση ενέργειας για την επίτευξη του επιθυμητού ορίου πίεσης υδρατμών κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. — πίεση υδρατμών ίση με την πίεση υδρατμών , —■— πίεση υδρατμών 100 kPa μεγαλύτερη από την πίεση υδρατμών, - - - - πίεση υδρατμών 50 kPa μεγαλύτερη από την πίεση υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος



Σχήμα 4. Απαιτούμενος ρυθμός ανανέωσης του αέρα κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου για την επίτευξη της επιθυμητής πίεσης υδρατμών στο εσωτερικού του θερμοκηπίου

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη μέθοδο υπολογισμού των επιθυμητών ορίων υγρασίας, που προτάθηκε σε αυτή την εργασία, μπορεί να γίνει εκτίμηση αυτής στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συμπυκνώσεις στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος της οροφής καθώς επίσης και της πρόσθετης ενέργειας που πρέπει να καταναλωθεί προκειμένου να επιτευχθεί η συγκεκριμένη τιμή. Η ενσωμάτωση ενός προσομοιώματος πρόβλεψης της ανάπτυξης της καλλιέργειας, καθώς και του συνολικού κόστους παραγωγής αλλά και του ενδεχόμενου τελικού οικονομικού αποτελέσματος (κέρδος ή ζημία) σε ένα προσομοίωμα ρύθμισης της υγρασίας θα επιτρέψει τη ορθότερη και πιο ολοκληρωμένη λήψη αποφάσεων για τη ρύθμιση της υγρασίας σε θερμοκήπια

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Hand, D.W., 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 229:143-158.
- 2 Bakker, R., 1984. Physiological disorders in cucumber under high humidities conditions and low ventilation rates in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 156: 257-164
- 3 Mortensen, L.M., 1986. Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants. *Scientia Horticulturae*, 29:301-307
- 4 Stanghellini, C. and de Jong, T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76:129-148
- 5 Jolliet, O., 1993. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering, Research* 57:23-37
- 6 De Hallaux, D. and Gauthier, L., 1998. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under Northern latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 35–42
- 7 Campen, J.B. and Bot, G.P.A., and de Zwart H.F., 2003. Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes. *Biosystems Engineering*, 86 (4): 487-493
- 8 Peiper U.M., Levav N., Geoola F. and Seginer I., 1987. Experimental evaluation and mathematical model of an hygroscopic greenhouse dehumidifier, Final Research Report. BARD Project I39082, Bet-Dagan, Israel 1987
- 9 Seginer, I. and Kantz, D., 1989. Night-time use of dehumidifiers in greenhouses: an analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44: 141–158
- 10 Boulard, T., Baille, A., Lagier, J., Mermier, M. and Vanderschmitt E., 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44; 191-204
- 11 Chasseriaux, G., 1987. Heat pumps for reducing humidity in plastics greenhouses. *Plasticulture*, 73: 29–40
- 12 Rouse, D. R., Martin, D. Y., Theriault, R., Leveillee, F. and Boily R., 2000. Heat recovery in greenhouses: a practical solution. *Applied Thermal Engineering*, 20: 687–706
- 13 Campen, J.B. and Bot, G.P.A., 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosystems Engineering*, 82 (2): 177-185
- 14 Kittas, C. and Bartzanas, T., 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations *Building and Environment*, 42 (10): 3774-3784
- 15 Μπαρτζάνας, Θ., 2004. Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά θερμοκήπια. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 286 σελ.

(223)

ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ

Κ. Κίττας^{1α}, Γ. Δημόκας^{1β} και Μ. Tchamitchian^{2γ}

¹Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστ., Τμ. Γεωπονίας, Φ.Π. & Α.Π.,
Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ^αckittas@uth.gr, ^βgedimoka@uth.gr

²Écodéveloppement, I.N.R.A., Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, Avignon Cedex 9,
84914, France, ^γarm@avignon.inra.fr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η πειραματική επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος στην ανάπτυξη και την παραγωγή καλλιέργειας τομάτας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Έγινε καταγραφή των στοιχείων που προσδιορίζουν την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας καθώς και των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό και στον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα του βιολογικού μοντέλου συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα και παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές.

VALIDATION OF A TOMATO CROP MODEL IN A GREENHOUSE DURING WINTER PERIOD

C. Kittas^{1a}, G. Dimokas^{1b} and M. Tchamitchian^{2c}

¹University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc., Dept. of Agric. Crop Prod. & Rural,
Env., Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias, ^ackittas@uth.gr, ^bgedimoka@uth.gr

²Écodéveloppement, I.N.R.A., Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, Avignon Cedex 9,
84914, France, ^carm@avignon.inra.fr

ABSTRACT

The aim of this work was the experimental confirmation of a biological simulator in tomato's development and production. For this purpose experiments were carried out in the farm of the University of Thessaly in the region of Velestino. The measurements that were collected can determine the development and the production of a tomato crop. Also the parameters of the greenhouse climate and the climate of the exterior region were collected. The results of the biological simulator were tested with the experimental data and observed a small deviation between the measured and the computed values.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι προστατευμένες καλλιέργειες των κηπευτικών, δρεπτών ανθέων και των διακοσμητικών φυτών αποτελούν το πεδίο με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη την τελευταία εικοσοετία στα αγροτικά θέματα. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες πλέον, μπορούν να θεωρηθούν ως η πιο εντατική και σύνθετης μορφής παραγωγική διαδικασία και πολλές φορές αναφέρονται ως η βιομηχανία των θερμοκηπίων για τονιστεί ο ρόλος της τεχνολογίας στη όλη διαδικασία [1]. Σύγχρονα θερμοκήπια καθιστούν δυνατή την εκλεπτυσμένη διαχείριση της παραγωγικής διαδικασίας, μέσω της διαχείρισης της θερμοκρασίας του αέρα της σχετικής υγρασίας (θέρμανση και αερισμός) της συγκέντρωση 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.

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 δύναται 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, έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων καθώς και για την πρόβλεψη και τον προγραμματισμό της παραγωγικής διαδικασίας. Συνεπώς το ενδιαφέρον για τη μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας για τις διάφορες καλλιέργειες ακόμη αυξάνεται όπως αυτό δηλώνεται από την αυξανόμενη αναλογία των δημοσιευμένων εργασιών που σχετίζονται με την μοντελοποίηση.

Διάφορα μοντέλα για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχουν αναπτυχθεί, όπως για παράδειγμα το χρυσάνθεμο, το αγγούρι, το μαρούλι, το ραπανάκι, το τριαντάφυλλο [8] και της τομάτας [4], [7]. Το μοντέλο TOMGRO των Jones et al., [7] έχει τεκμηριωθεί, βαθμονομηθεί και επιβεβαιωθεί από τους Dayan et al. [2], [3]. Οι περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, ασχολούνται με την ανάπτυξη και παραγωγή της τομάτας. Ένα περιεκτικό και γενικό μοντέλο για την προσομοίωση της φωτοσύνθεσης και της παραγωγής του ξηρού βάρους στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχει αναπτυχθεί από τον Gijzen [5]. Τα περισσότερα μοντέλα παρουσιάζονται ελλιπή, ή μη τελειοποιημένα όταν για παράδειγμα μοντελοποιείται μόνο η ανάπτυξη της καλλιέργειας, ενώ πολλές φορές δεν έχουν βαθμονομηθεί.

Η λειτουργία των βιολογικών προσομοιωμάτων στηρίζεται στην παραγωγή του ξηρού βάρους. Η καλλιέργεια προσδιορίζεται από το παραγόμενο ξηρό βάρος, την οργανογένεση και από την κατανομή του ξηρού βάρους στον αριθμό των παραγόμενων οργάνων. Αυτά τα χαρακτηριστικά όχι μόνο σχετίζονται 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.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η πειραματική επιβεβαίωση ενός βιολογικού προσομοιώματος με αρχικό στόχο τον έλεγχο της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας της τομάτας. Για πρώτη φορά επιχειρείται η χρήση του μοντέλου

προσομοίωσης για τον υπολογισμό της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας για ορισμένο χρονικό διάστημα, καθώς η καλλιέργεια κορυφολογείται, σύμφωνα πάντα με την καλλιεργητική πρακτική που ακολουθείται στη χώρα μας. Για το σκοπό αυτό και μέσα από πειραματικές μετρήσεις του κλίματος και της ανάπτυξης και της παραγωγής των φυτών, διερευνήθηκε η πιστότητα των παραγόμενων τιμών που προκύπτουν από τη χρήση του βιολογικού προσομοιώματος σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή του Βιολογικού Μοντέλου

Το βιολογικό μοντέλο περιγράφει ποσοτικά την αύξηση της καλλιέργειας της τομάτας, ταυτόχρονα με τον αριθμό και τη συσσώρευση του ξηρού βάρους των κύριων μερών του φυτού (ρίζα, βλαστού, φύλλων και καρπών). Η παραγωγή του αριθμού των οργάνων αποτελεί εξάρτηση του ρυθμού εμφάνισης και της ηλικίας. Η συσσώρευση του ξηρού βάρους προέρχεται από το ισοζύγιο του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και τον καταμερισμό του βάρους μεταξύ των οργάνων.

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 στην μεταβολή των κλιματικών συνθηκών, όπως στην ένταση του φωτός και την συγκέντρωση του CO_2 . 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.

2.1.1. Οργανογέννηση

Η οργανογέννηση αποτελεί τη μεταβολή του αριθμού των οργάνων του φυτού και συμβαίνει μέσω του σχηματισμού 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 την θερμοκρασία και τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO_2 . 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.

2.1.2. 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 CO_2) και την ηλικιακή κλάση για κάθε ένα από τα μέρη του φυτού [6]. 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».

2.1.3. Κατανομή της παραγόμενης βιομάζας

Ο διαχωρισμός του ξηρού βάρους μεταξύ των οργάνων του φυτού μπορεί να περιγραφεί από τη δυνάμενη αύξηση [6]

Στο μοντέλο η κατανομή των αφομοιωσίων στοιχείων καθορίζεται από το λόγω της δυνάμενης προς την αιτούμενη ποσότητα και εξαρτάται από την ηλικία του φυτού και τη θερμοκρασία [9].

2.1.4. 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.

2.2. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο αγρόκτημα του Βελεστίνου στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απριλίου 2006. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε θερμοκήπιο, τροποποιημένο τοξωτό, επιφανείας 160 m² (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος) και μέγιστου ύψους 4,1m στον κορφιά, ενώ το ύψος του ορθοστάτη έφτανε τα 2,9m. Ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε και δεύτερο θερμοκήπιο ίδιου τύπου για το μέγιστο φυτών που χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπλήρωση των κενών που δημιουργήθηκαν κατά τις καταστροφικές μετρήσεις προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πυκνότητα (2.4 φυτά / m²) στο εσωτερικό του πειραματικού θερμοκηπίου. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό.

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. Η δόση άρδευσης, ο χρόνος και η ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος, ελέγχονταν αυτόματα με το πρόγραμμα MACQU (Management and Control for Quality in Greenhouse). Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια, ήταν 2,1 mScm⁻¹ και το pH ήταν 5,6 με μικρές τροποποιήσεις, ανάλογα με της συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.

2.3. Κλιματικές μετρήσεις

Οι κλιματικοί παράμετροι που καταγράφονταν τόσο στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου όσο και στο εσωτερικό του παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η θερμοκρασία (T_o, °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Do, kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το ψυχρόμετρο μετρούσε τις θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου από τις οποίες υπολογίζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.
- Η ηλιακή ακτινοβολία (RG_o, Wm⁻²) με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).
- Η ταχύτητα του αέρα (u, m s⁻¹) με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).
- Η διεύθυνση του αέρα (WD °) με ανεμοδείκτη (τύπος WD1-UM3-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).

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).

2.4. Βιολογικές μετρήσεις

2.4.1. Μετρήσεις ανάπτυξης της καλλιέργειας

Για τη μελέτη της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών επιλέχθηκαν 8 φυτά εκατέρωθεν του κέντρου του θερμοκηπίου, στις δύο μεσαίες διπλές σειρές. Οι μετρήσεις ανάπτυξης των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών πραγματοποιούνταν με συχνότητα 3 φορές για κάθε εβδομάδα καθ'όλη την πειραματική περίοδο. Μετρήθηκαν:

- i. Το μήκος του φυτού

- ii. Ο συνολικός αριθμός φύλλων
- iii. Ο αριθμός των νεκρών και αφαιρούμενων φύλλων
- iv. Ο αριθμός των κόμβων
- v. Ο συνολικός αριθμός των ταξιανθιών
- vi. Ο αριθμός των ανθέων ανά ταξιανθία
- vii. Ο αριθμός των καρπών ανά ταξιανθία

2.4.2. Μετρήσεις της παραγόμενης βιομάζας

Καθόλη την πειραματική περίοδο πραγματοποιήθηκαν 10 καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού. Οι καταστροφικές μετρήσεις πραγματοποιούνταν κάθε 2 εβδομάδες σε φυτά, διαφορετικά σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο και την τυχαία κατανομή τους, ενώ τα κενά τους συμπληρώνονταν με επιπρόσθετα φυτά που βρίσκονταν στο ίδιο στάδιο ανάπτυξης. Για κάθε μέτρηση καταστρέφονταν 4 φυτά και καταγράφονταν το χλωρό βάρος και το ξηρό βάρος των ιστών (φύλλα, βλαστός, καρποί, άνθη, ρίζα). Το ξηρό βάρος καταγράφονταν μετά την εισαγωγή των φυτών σε φούρνο, στους 105°C για 24 ώρες, εκτός από τους καρπούς, στους οποίους η θερμοκρασία κατά την ξήρανση ήταν στους 75°C.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιώματος

Για την πειραματική επιβεβαίωση του βιολογικού προσομοιώματος απαιτήθηκε ο στατιστικός προσδιορισμός των παραμέτρων των μαθηματικών εξισώσεων, αρχικές τιμές απόδοσης του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας και χρήση των κλιματικών μετρήσεων. Τα στοιχεία για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από την αναζήτηση της βιβλιογραφίας, ενώ μέρος αυτών συμπληρώθηκε 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 κλιματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν τα κλιματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την πειραματική περίοδο.

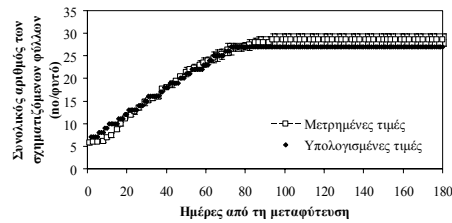
3.2. Υπολογισμοί του αριθμού των φύλλων, των ταξιανθιών, των κόμβων και της φυλλικής επιφάνειας των φυτών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού των φύλλων, των ταξιανθιών και των κόμβων και της φυλλικής επιφάνειας των φυτών για την πειραματική περίοδο απεικονίζονται στα σχήματα 1.a, 1.b, 1.c, 1.d. Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του αριθμού των φύλλων των ταξιανθιών και των κόμβων, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Μικρή απόκλιση παρατηρείται στις μετρημένες τιμές της φυλλικής επιφάνειας από τις υπολογισμένες και οφείλεται στην κορυφολόγηση που πραγματοποιήθηκε στα πειραματικά φυτά, με άμεση συνέπεια στη διαφοροποίηση των τιμών.

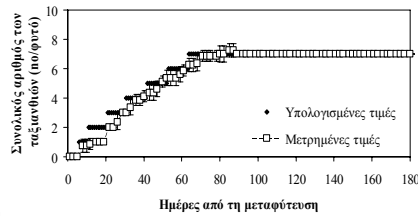
3.3. Υπολογισμός του ξηρού βάρους των βλαστών και των φύλλων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ξηρού βάρους των βλαστών και των φύλλων των φυτών για την πειραματική περίοδο απεικονίζονται στα σχήματα 2.a., 2.b. Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του ξηρού βάρους των βλαστών, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση. Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές μετά το χρονικό διάστημα των 85 ημερών. Οι μικρές αποκλίσεις στις μετρημένες τιμές του ξηρού βάρους των βλαστών από τις υπολογισμένες οφείλονται, στην κορυφολόγηση που

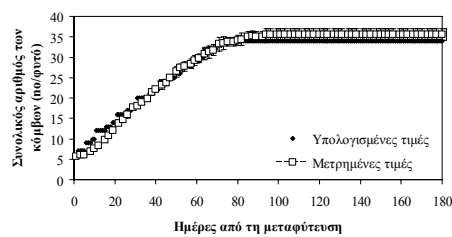
πραγματοποιήθηκε στα πειραματικά φυτά και που εμφανίζεται με σταθεροποίηση των υπολογισμένων τιμών μετά την 85^η ημέρα, κάτι που οδηγεί σε μικρή ποσοτικά υποεκτίμηση των τιμών.



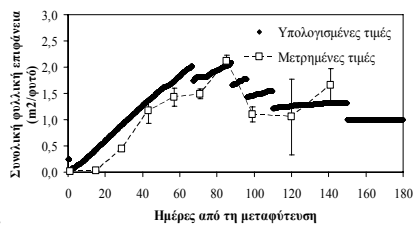
1.a



1.b

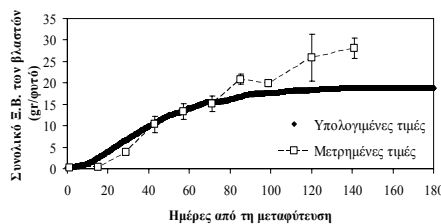


1.c

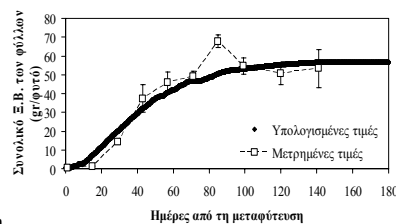


1.d

Σχήματα 1.a, 1.b, 1.c, 1.d. Εξέλιξη του συνολικού αριθμού των φύλλων, των ταξιανθιών και των κόμβων των φυτών (no/φυτό) καθώς και η εξέλιξη της φυλλικής επιφάνειας ($m^2/φυτό$) κατά την πειραματική περίοδο



2.a

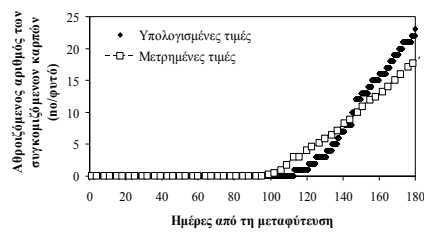


2.b

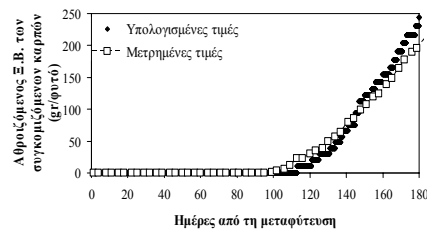
Σχήματα 2.a, 2.b. Εξέλιξη του συνολικού ξηρού βάρους των βλαστών και των φύλλων των φυτών (gr/φυτό) κατά την πειραματική περίοδο

3.4. Υπολογισμός του αριθμού και του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων καρπών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού και του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων καρπών των φυτών για την πειραματική περίοδο απεικονίζονται στα σχήματα 3.a., 3.b. Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του αριθμού και του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων καρπών, στις μετρημένες και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση, ενώ παρουσιάζει ταύτιση των τιμών για μεγάλο χρονικό διάστημα της πειραματικής περιόδου. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές μετά το χρονικό διάστημα των 150 ημερών, οφείλονται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός του βιολογικού προσομοιώματος βασίζεται στην ηλικία ωρίμανσης των καρπών που διαφοροποιεί τόσο τον παραγόμενο αριθμό όσο και τη παραγόμενη βιομάζα των καρπών σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.



3.a

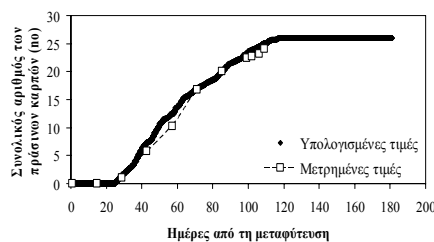


3.b

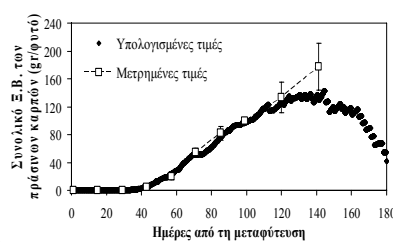
Σχήματα 3.a, 3.b. Εξέλιξη του συνολικού αριθμού (no/φυτό) και του ξηρού βάρους (gr/φυτό) των ώριμων καρπών των φυτών κατά την πειραματική περίοδο

3.5. Υπολογισμός του αριθμού και του ξηρού βάρους των μη συγκομιζόμενων καρπών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού και του ξηρού βάρους των μη συγκομιζόμενων (πράσινων) καρπών των φυτών για την πειραματική περίοδο απεικονίζονται στα σχήματα 4.a., 4.b. Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του αριθμού και του ξηρού βάρους των μη συγκομιζόμενων (πράσινων) καρπών, στις μετρημένες και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση, ενώ παρουσιάζει μικρή απόκλιση στο τέλος της πειραματικής περιόδου. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός του βιολογικού προσομοιώματος βασίζεται σε διαφορετική ηλικία ωρίμανσης των καρπών σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.



4.a



4.b

Σχήματα 4.a, 4.b. Εξέλιξη του συνολικού αριθμού (no/φυτό) και του ξηρού βάρους (gr/φυτό) των πράσινων καρπών των φυτών κατά την πειραματική περίοδο

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα του βιολογικού προσομοιώματος με την προσθήκη του κορυφολογήματος κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών τομάτας επιβεβαιώθηκαν με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων και συμφωνούν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη χρήση του βιολογικού προσομοιώματος από τους Jones et al., [7] και τους Dayan et al. [2], [3]. Ο υπολογισμός των απαιτήσεων των φυτών για δημιουργία νέων οργάνων συμφωνεί με τις πειραματικές μετρήσεις ενώ και η παραγόμενη βιομάζα παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις και αποδίδει πιστά την πραγματικότητα κάτι που συμφωνεί με τους Jones et al., [7] και τους Dayan et al. [2], [3].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πειραματική επιβεβαίωση του βιολογικού προσομοιώματος παρά τις μικρές αποκλίσεις που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες τιμές δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής του για τον υπολογισμό της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας τομάτας. Η διαφοροποίηση που πραγματοποιήθηκε και η διακοπή στην

πορεία ανάπτυξης των φυτών κάνει το βιολογικό προσομοίωμα συμβατό με την κύρια πρακτική που ακολουθείται από τους παραγωγούς.. Η σύνδεση του με ένα φυσικό προσομοίωμα αναμένεται να συμβάλει στην βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και να στηρίξει αποτελεσματικά την εκλογή στρατηγικών διαχείρισης από τους παραγωγούς, με απώτερο στόχο την μείωση του κόστους παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια υποέργου ΠΕΝΕΔ2003 (Μέτρο 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κ.Π.Σ.), το οποίο συγχρηματοδοτείται κατά 90% από δημόσιες δαπάνες (75% της δημόσιας δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και 25% της δημόσιας δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας) και κατά 10% από τον ιδιωτικό τομέα (ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Challa, H.; Bakker, J.C. 1995. In: Greenhouse climate control: an integrated approach, J.C. Bakker et al. (eds.). *Wageningen Pers*, The Netherlands, 97-100.
2. 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. *Agric. Syst.*, 43: 145-163.
3. 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. II. Field calibration and validation. *Agric. Syst.*, 43: 165-183.
4. De Konning A.N.M. (1994). Development and dry matter distribution in glasshouse tomato : a quantitative approach. *Phd thesis*, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
5. Gijzen, H., 1992. Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. CABO-DLO, Wageningen. 70 p. *Simulation Report CABO-TT*, no. 28.
6. Hurd, R.G. and J.H.M. Thornley, 1974. An analysis of the growth of young tomato plants in water culture at different light integrals and CO₂ concentrations. I. Physiological aspects. *Ann. Bot.*, 38: 375-388.
7. 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.
8. Lieth J.H., Pascian C.C. (1991). A simulation model for the growth and development of flowering rose shoots. *Scientia Hort.*, 46: 109-128.
9. 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.). *Ann. Bot.*, 52: 357-363.

(224)

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

Γ. Δημόκας¹, Κ. Κίττας¹, Ν. Κατσούλας¹ και Ν. Δημόκας²

¹Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστ., Τμ. Γεωπονίας, Φ.Π. & Α.Π.

Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, gedimoka@uth.gr, ckittas@uth.gr

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμ. Πληροφορικής, Οδός 26^{ης} Οκτωβρίου 10, Τ.Κ. 54124, Θεσ/νίκη dimokas@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση ενός προσομοιώματος του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα φυσικό προσομοίωμα του θερμοκηπίου που περιλαμβάνει 5 υπό-προσομοιώματα η ολοκλήρωση των οποίων οδηγεί στον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων του θερμοκηπίου. Για την πειραματική βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο αγρόκτημα του Π.Θ. στην περιοχή του Βελεστίνου. Τα αποτελέσματα του προσομοιώματος συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα και παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές.

VALIDATION OF A GREENHOUSE CLIMATE MODEL DURING WINTER PERIOD

G. Dimokas¹, C. Kittas¹, N. Katsoulas¹ and N. Dimokas²

¹University of Thessaly, Sch. of Agricultural Sc., Dept. of Agriculture Crop Prod. & Rural, Env., Fytokou Str, 38446, N. Ionia Magnesias

²Aristotle University of Thessaloniki, Dept. of Computer Sciences, 26th October 10 Str, 54124, Thessaloniki

ABSTRACT

The aim of this work was the validation and experimental confirmation of a greenhouse climate simulator. For this purpose a simulator for the greenhouse climate was developed and contains 5 sub-simulators. The integration of the sub-simulators can guide to the estimation of the greenhouse climate parameters. In order to achieve validation and experimental confirmation, experiments were carried out in the farm of the University of Thessaly in the region of Velestino. The results of the greenhouse climate simulator were tested with the experimental data and observed a small deviation between the measured and the computed values.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 τη ενέργειας οδήγησαν στη χρήση των θερμοκουρτινών, συμπτυκνωτών καυσσαερίων, διπλών πλαστικών, χαμηλότερων σημείων για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στην ελαχιστοποίηση του αερισμού [1]. 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 πιο 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.

Παρά τη μεγάλη πρόοδο των τελευταίων ετών στη θεωρητική ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης στον τομέα των θερμοκηπίων στην πράξη υπήρξε μικρή πρόοδος στην υλοποίηση των μοντέλων και των στρατηγικών διαχείρισης στο πεδίο της καθημερινής παραγωγής σε εμπορικά θερμοκήπια [2], 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 υφίσταται κέρδος, σε κάποιο από τα προβλήματα διαχείρισης του κλίματος όπως π.χ. ο βιολογικός έλεγχος των ασθενειών. Οι εταιρίες που με τη χρήση των εργαλείων διαχείρισης προσπαθούν να συμβάλουν στο έλεγχο του κλίματος θεωρούν ότι βασική αρχή στο σχεδιασμό των μοντέλων είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους για διαφορετικές καλλιέργειες. Κρίνεται επίσης απαραίτητο να είναι εύκολα στη χρήση από τον πιθανό χρήστη και ταυτόχρονα να είναι ανεξάρτητα από το λογισμικό που χρησιμοποιείται, για να εκτελεστεί στην πράξη σε εμπορικά θερμοκήπια. Τα συστήματα σχηματισμού της απόφασης [3], συμβουλευούν τον παραγωγό πώς να εισάγει μοντέλα χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα πληροφορίες και γνώσεις από πολλές διαφορετικές πηγές.

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. Η επίλυση του δύναται να στηριχθεί στην χρήση φυσικών προσομοιωμάτων που με την ταυτόχρονη χρήση μιας γεννήτριας εξωτερικών κλιματικών δεδομένων θα δύναται να προβλέπουν το κλίμα στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων για χρονικό διάστημα τουλάχιστον τριών ημερών και θα συμβάλλει στον προγραμματισμό των παραγωγών. Ταυτόχρονα η σύνδεσή του με ένα βιολογικό προσομοίωμα θα ικανοποιήσει την ανάγκη για πρόβλεψη της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας και τον ανάλογο προγραμματισμό σύμφωνα με τη στρατηγική διαχείρισης για την επίτευξη των στόχων των παραγωγών.

Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια για αποτελεσματική διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων οδήγησε στη δημιουργία νέων κλιματικών προσομοιωμάτων. Οι Pieters και Deltour [4], παρουσίασαν το GCM, 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 [5], στο κλιματικό τους προσομοίωμα MICGREEN ο υπολογισμός των θερμοκρασιών του αέρα, της καλλιέργειας, του καλύμματος και του εδάφους γίνεται με τη χρήση τεσσάρων ισοζυγίων ενέργειας. Οι Ghosal et al., [6], [7], χρησιμοποιούν στο κλιματικό τους προσομοίωμα την ύπαρξη του βόρειου τοίχου, καθώς οι περισσότερες κατασκευές στις συγκεκριμένη περιοχή καλύπτουν τη βορινή πλευρά του θερμοκηπίου για την μείωση των απωλειών θερμότητας. Στο HORTITRANS ο Jolliet [8], 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, υγροποίησης και από-υγροποίησης. Τέλος οι Gijzen et al., [9], παρουσίασαν το HORTISIM ένα βιοφυσικό προσομοίωμα, υπολογισμού τόσο της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας της τομάτας όσο και των κλιματικών μεταβολών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ανάπτυξη, βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση ενός φυσικού προσομοιώματος με στόχο τον έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων και ιδιαίτερα τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα. Σκοπός της πειραματικής επιβεβαίωσης του φυσικού προσομοιώματος είναι η σύνδεση του με ένα βιολογικό προσομοίωμα για την βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

2. ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

2.1. Περιγραφή του προσομοιώματος

Η προσομοίωση του “ισοζυγίου ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου” επιβάλει την ανάλυση του ισοζυγίου ενέργειας του κάθε επιμέρους συστήματος που αλληλεπιδρά θερμικά. Κάθε ισοζύγιο ενέργειας συνίσταται από διαφορετικές 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 μεταφοράς θερμότητας, η διαπνοή των φυτών, ο αερισμός καθώς και τα φαινόμενα συμπύκνωσης και υγροποίησης στο κάλυμμα και την καλλιέργεια.

Το κλιματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε περιγράφει ποσοτικά, την 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-μοντέλα που συνδέονται με την κύρια μηχανή και 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

2.2. Μεταβλητές εισόδου – εξόδου

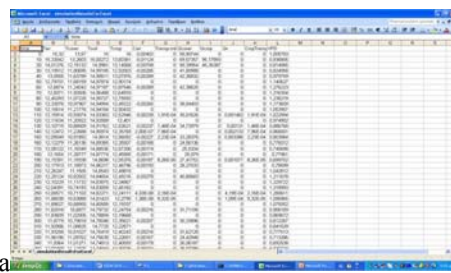
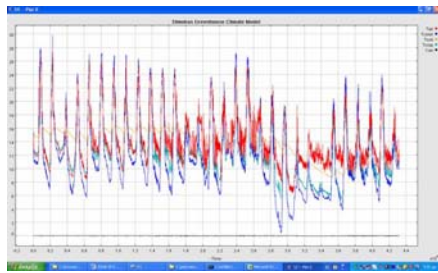
Ο προσομοιωτής έχει ανοικοδομηθεί γύρω από μια κεντρική μηχανή που παρέχει τη δυνατότητα τροφοδοσίας και εισαγωγής δεδομένων στα εκάστοτε ισοζύγια ενέργειας που διασυνδέονται γύρω από αυτήν. Η διαδικασία λειτουργίας του προσομοιωτή περιλαμβάνει τη δημιουργία μεταβλητών εισόδου από τον χρήστη, που περιγράφουν τις κλιματικές παραμέτρους του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου. Οι μεταβλητές εισόδου που διαβάσει ο προσομοιωτής είναι:

- ☀ Η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα
- ☀ Η εξωτερική σχετική υγρασία του αέρα
- ☀ Η εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία
- ☀ Η εξωτερική ταχύτητα του ανέμου
- ☀ Το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων
- ☀ Η ποσότητα ενέργειας που προσδίδει το σύστημα θέρμανσης στο θερμοκήπιο

Οι μεταβλητές εισόδου επεξεργάζονται από τον προσομοιωτή και παράγουν ως αποτέλεσμα τις μεταβλητές εξόδου (Εικόνα 1.β.), με ταυτόχρονη απεικόνισή τους σε

γραφική παράσταση (Εικόνα 1.α.) και αποθήκευσή τους σε φάκελο Excel. Οι μεταβλητές εξόδου 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



Εικόνα 1.α, 1.β. Γραφική απεικόνιση και το παραγόμενο αρχείο του Excel με αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου

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 συμπίκνωση στο κάλυμμα
- ☀ Τη συμπίκνωση στην καλλιέργεια
- ☀ Τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία
- ☀ Τις ποσότητες ενέργειας που μεταφέρονται με συναγωγή

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο αγρόκτημα του Βελεστίου στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απριλίου 2006. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε θερμοκήπιο, τροποποιημένο τοξωτό, επιφανείας 160 m² (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος) και μέγιστου ύψους 4.1m στον κορφιά, ενώ το ύψος του ορθοστάτη έφτανε τα 2.9m. Η πυκνότητα φύτευσης, στο εσωτερικό του πειραματικού θερμοκηπίου ήταν 2.4 φυτά / m². Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό.

Για τη θρέψη των φυτών χρησιμοποιήθηκε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα έτσι ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος μολύνσεων από ασθένειες του εδάφους και να διασφαλιστεί η βέλτιστη θρέψη των φυτών. Η δόση άρδευσης, ο χρόνος και η ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος, ελέγχονταν αυτόματα με το πρόγραμμα MACQU (Management and Control for Quality in Greenhouse). Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια, ήταν 2,1 mScm⁻¹ και το pH ήταν 5,6 με μικρές τροποποιήσεις, ανάλογα με της συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.

3.2. Κλιματικές μετρήσεις

Οι κλιματικοί παράμετροι που καταγράφονταν τόσο στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου όσο και στο εσωτερικό του παρουσιάζονται παρακάτω:

✗ 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.

✗ Η ηλιακή ακτινοβολία ($R_{G_o}, \text{W m}^{-2}$) με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).

✗ Η ταχύτητα του αέρα ($u, \text{m s}^{-1}$) 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).

Επιπλέον καταγράφονταν στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου οι παρακάτω κλιματικοί παράμετροι:

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

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

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

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

ο Η παροχή ενέργειας πραγματοποιούνταν από αερόθερμο και 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 (Thermistor 5 KΩ) και στην έξοδο του νερού επιστροφής. Η παροχή ενέργειας E_h σε W από κάθε σύστημα χωριστά υπολογίζονταν σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{th} = [pq_w Q_w (T_{in} - T_{out})] \Delta t \quad (1)$$

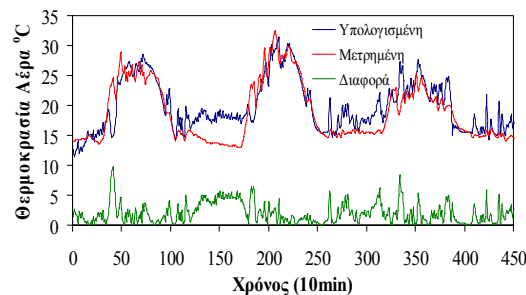
όπου q_w είναι η ειδική θερμότητα του νερού σε $\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$, Q_w είναι η παροχή του νερού σε $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, T_{in} και T_{out} είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού σε $^\circ\text{C}$ και Δt είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο το νερό κυκλοφορεί στο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

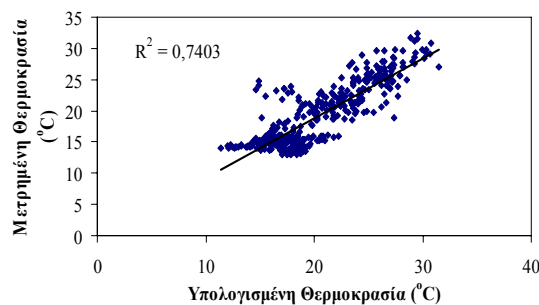
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Βαθμονόμηση του ισοζυγίου ενέργειας του αέρα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα, για τρεις τυχαίες ημέρες απεικονίζονται στο *σχήμα 1*. Παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή της κλίσης που ακολουθεί η πορεία αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές πραγματοποιείται στο ίδιο χρονικό διάστημα. Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζουν οι παραγόμενες από τις μετρημένες τιμές για κάποια χρονικά διαστήματα. Η συσχέτιση των μετρημένων με τις υπολογισμένες τιμές παρουσιάζεται στο *σχήμα 2*. Ο βαθμός συσχέτισης είναι 66% και αποδεικνύει τη σχετική απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές. Η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές, κυμάνθηκε στο επίπεδο του 30%. Η απόκλιση θεωρείται μικρή και επιτρέπει τη χρήση του κλιματικού προσομοιώματος για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του αέρα.



Σχήμα 1. Διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα (°C) από τις 3 έως τις 5 Μαρτίου 2006

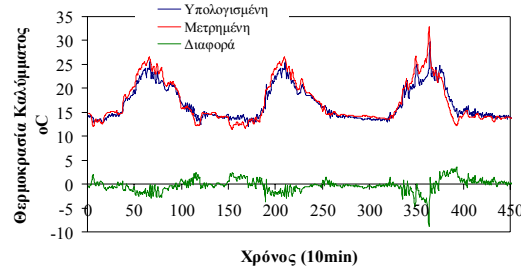


Σχήμα 2. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα (°C) από τις 3 έως τις 5 Μαρτίου 2006

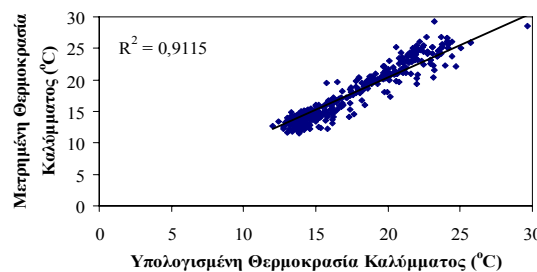
4.2. Βαθμονόμηση του ισοζυγίου ενέργειας του καλύμματος

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας του καλύμματος, για τρεις τυχαίες ημέρες απεικονίζονται στο *σχήμα 3*. Παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή της κλίσης που ακολουθεί η πορεία αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές πραγματοποιείται στο ίδιο χρονικό διάστημα. Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζουν οι παραγόμενες από τις μετρημένες τιμές για κάποια χρονικά διαστήματα. Η συσχέτιση των μετρημένων με τις υπολογισμένες τιμές παρουσιάζεται στο *σχήμα 4*. Ο βαθμός συσχέτισης είναι 91% και αποδεικνύει τη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές. Η μέγιστη ποσοστιαία

διαφορά των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές, κυμάνθηκε στο επίπεδο του 25-30%. Η απόκλιση θεωρείται μικρή και επιτρέπει τη χρήση του κλιματικού προσομοιώματος για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του καλύμματος.



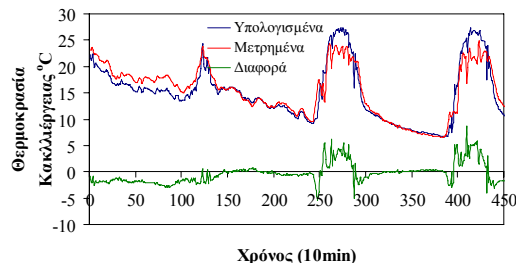
Σχήμα 3. Διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) από τις 7 έως τις 10 Οκτωβρίου 2006



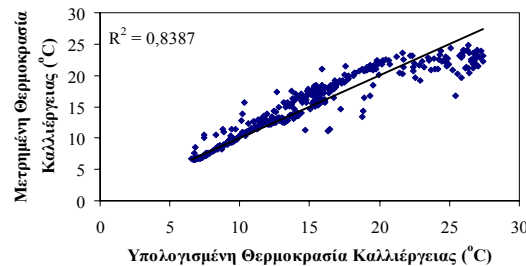
Σχήμα 4. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) από τις 7 έως τις 10 Οκτωβρίου 2006

4.3. Βαθμονόμηση του ισοζυγίου ενέργειας της καλλιέργειας

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, για τρεις τυχαίες ημέρες απεικονίζονται στο σχήμα 5. Παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή της κλίσης που ακολουθεί η πορεία αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές πραγματοποιείται στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αποκλίσεις παρουσιάζουν οι παραγόμενες από τις μετρημένες τιμές για κάποια χρονικά διαστήματα. Η συσχέτιση των μετρημένων με τις υπολογισμένες τιμές παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Ο βαθμός συσχέτισης είναι 83% και αποδεικνύει την απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές. Η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές, κυμάνθηκε στο επίπεδο του 40%. Η απόκλιση θεωρείται μικρή και επιτρέπει τη χρήση του κλιματικού προσομοιώματος για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας της καλλιέργειας.



Σχήμα 5. Διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας της καλλιέργειας (°C) από τις 17 έως τις 19 Δεκεμβρίου 2006



Σχήμα 6. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας της καλλιέργειας (°C) από τις 17 έως τις 19 Δεκεμβρίου 2006

Τα αποτελέσματα του φυσικού προσομοιώματος αποδίδουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς επιβεβαιώθηκαν με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων και συμφωνούν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη χρήση του φυσικού προσομοιώματος των Pieter και Deltour, [6]. Η μείωση των διαφορών που παρουσιάζονται με τις πραγματικές τιμές αναμένεται να συμβάλει στη δημιουργία ενός φυσικού προσομοιώματος που θα ικανοποιεί την ανάγκη των παραγωγών για έλεγχο των κλιματικών μεταβολών στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βαθμονόμηση του φυσικού προσομοιώματος παρά τις μικρές αποκλίσεις που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες τιμές δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής του για τον έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων. Η περαιτέρω ανάπτυξή του και η σύνδεση του με ένα βιολογικό προσομοίωμα αναμένεται να συμβάλει στην βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και να στηρίξει αποτελεσματικά την εκλογή στρατηγικών διαχείρισης από τους παραγωγούς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια υποέργου ΠΕΝΕΔ2003 (Μέτρο 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κ.Π.Σ.), το οποίο συγχρηματοδοτείται κατά 90% από δημόσιες δαπάνες (75% της δημόσιας δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και 25% της δημόσιας δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας) και κατά 10% από τον ιδιωτικό τομέα (ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pluimers J. C., Kroeze C., Bakker E. J., Challa H. and 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.
2. van Straten G., Challa H. and Buwalda F., 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26: 221-238.
3. Clarke N. D., Shipp J. L., Papadopoulos A. P., Jarvis W. R., Khosla S., Jewett T. J. and 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.
4. Pieters J.; Deltour J., 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding material. *Journal of Agricultural Engng. Res.*, 68: 125-137.
 5. Singh G., Singh P.P., Singh Lubana P. P., and Singh K.G., 2006. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, 31: 1541-1560.
 6. Ghosal M.K. and Tiwari G.N., 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 47: 1779-1798.
 7. Ghosal M.K., Tiwari G.N., and Srivastava N. S. L., 2004. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. *Energy and Buildings*, 36: 219-227.
 8. Jolliet, O., 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 23-37.
 9. 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 Hort.*, 456: 2005.

(225)

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΓΙΑ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΣΠΟΡΟΦΥΤΩΝ

Ν. Κατσούλας, Κ. Πεπονάκης, Δ. Πετσάνη, Κ. Κίττας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας, Φυτ. Παρ. & Αγρ. Περιβάλλοντος,
Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, Ν. Ιωνία
Μαγνησίας, 38446, Βόλος, nkatsoul@uth.gr, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη προσομοιωμάτων που περιγράφουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας συναρτήσει του μικροκλίματος των θερμοκηπίων αποτελεί εργαλείο μέσω του οποίου θα μπορούσε να επιτευχθεί ορθολογική ρύθμιση του μικροκλίματος για προγραμματισμένη παραγωγή υγιών και ομοιόμορφων φυτών. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανάπτυξης σε καλλιέργεια σποροφύτων τομάτας οι οποίες συγκρίθηκαν με τις τιμές που προέβλεπε το προσομοίωμα tomgro. Η σύγκριση των τιμών έδειξε ότι το προσομοίωμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει αλλά μόνο μετά από προσαρμογή για καλλιέργεια σποροφύτων και επαναβαθμονόμηση.

STUDY OF A TOMATO CROP GROWTH MODEL FOR OPTIMAL CLIMATE MANAGEMENT OF A NURSERY GREENHOUSE CROP

N. Katsoulas, C. Peponakis, D. Petsani, C. Kittas

University of Thessaly, Dept. of Agriculture, Crop Production & Rural Envir., Lab. of
Agricultural Construct. & Env. Cont., Fytokou St., 38446, N. Ionia, Magnesia, Greece

ABSTRACT

Models describing crop growth as a function of the greenhouse microclimate could be a valuable tool for greenhouse microclimate optimization and control, for high quality production of healthy seedlings at fixed dates. Aim of this work was to study the efficiency of a tomato crop growth model (tomgro) in predicting the growth of a tomato seedlings crop. On this purpose, tomato seedlings were cultivated and measurements of seedlings growth were conducted. The results were compared with the values predicted by the model. The comparison between measured and estimated values did not gave good results and showed that the model can not be used as is, but only after recalibration and adaptation for tomato seedlings crop.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καλλιέργεια λαχανοκομικών ειδών υπό κάλυψη έγινε ιδιαίτερα απαιτητική όσον αφορά την ποιότητα κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Βασική προϋπόθεση για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων είναι το σωστό ξεκίνημα της καλλιέργειας με σπορόφυτα καλής ποιότητας. Στις καλλιέργειες σποροφύτων, που έχουν ως στόχο την παραγωγή υγιών, σκληραγωγημένων και ομοιόμορφων φυτών σε καθορισμένες ημερομηνίες και ποσότητες, ο έλεγχος του περιβάλλοντος πρέπει να είναι αυστηρός και ακριβής. Ως εκ τούτου, η διαχείριση του εξοπλισμού για τη ρύθμιση του μικροκλίματος είναι ιδιαίτερα σημαντική για μια θερμοκηπιακή μονάδα παραγωγής σποροφύτων. Μεταξύ των παραγόντων του μικροκλίματος που επηρεάζουν την ανάπτυξη των σποροφύτων είναι η θερμοκρασία του αέρα, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συγκέντρωση του CO₂ [1]. Η ανάπτυξη προσομοιωμάτων που περιγράφουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων του μικροκλίματος αποτελεί ένα εργαλείο μέσω του οποίου θα μπορούσε να επιτευχθεί ορθολογική ρύθμιση του μικροκλίματος για προγραμματισμένη παραγωγή υγιών και ομοιόμορφων φυτών με ταυτόχρονη αξιοποίηση των ενεργειακών εισροών και εξοικονόμηση ενέργειας.

Είναι γεγονός ότι μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί κάποιο προσομοίωμα για την πρόβλεψη της ανάπτυξης καλλιέργειας σποροφύτων τομάτας. Τα προσομοιώματα ανάπτυξης τομάτας που έχουν αναπτυχθεί εστιάζουν στο παραγωγικό στάδιο της καλλιέργειας. Στο στάδιο αυτό υπάρχει ταυτόχρονη ανάπτυξη βλαστικών και αναπαραγωγικών οργάνων και η καλλιέργεια βρίσκεται σε στάδιο γραμμικής αύξησης της βιομάζας της συναρτήσει του χρόνου. Αντίθετα τα σπορόφυτα δεν έχουν αναπαραγωγικά όργανα, καθώς παραδίδονται στους παραγωγούς το αργότερο όταν έχει εμφανιστεί και πριν ανθίσει η πρώτη ταξιανθία, στάδιο μέχρι το οποίο η αύξηση της βιομάζας τους είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου [2]. Οι Pucheta et al. [3] σε προσπάθεια που έχουν κάνει για τον βέλτιστο έλεγχο της καλλιέργειας σποροφύτων τομάτας, χρησιμοποίησαν το προσομοίωμα TOMGRO [4]. Το προσομοίωμα TOMGRO είναι δοκιμασμένο για προσομοίωση καλλιέργειας τομάτας, ωστόσο δεν έχει δοκιμαστεί για καλλιέργεια σποροφύτων. Επίσης, το προσομοίωμα αυτό δεν μπορεί να προσομοιώσει χαρακτηριστικά απαραίτητα για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό των σποροφύτων, όπως το ύψος του φυτού, οι διαστάσεις της κόμης του φυτού, το πάχος του βλαστού, ο χρόνος εμφάνισης πρώτης ταξιανθίας κ.α. Η χρήση βέλτιστου ελέγχου μπορεί να μειώσει κατά 10% το κόστος θέρμανσης, ωστόσο για επιτυχή βέλτιστο έλεγχο απαιτείται ένα αξιόπιστο προσομοίωμα ανάπτυξης [5].

Άλλα προσομοιώματα καλλιέργειας τομάτας είναι τα TOMSIM [6] και HORTISIM [7], με το δεύτερο να αποτελεί ένα προσομοίωμα που στοχεύει γενικά στην προσομοίωση θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Τα παραπάνω είναι στοχαστικά προσομοιώματα και δεν έχουν δοκιμαστεί για καλλιέργεια σποροφύτων.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία δεν έχουν αναφερθεί στατιστικά προσομοιώματα για την προσομοίωση καλλιέργειας τομάτας ή σποροφύτων τομάτας, αν και η κατάλληλη μεθοδολογία στατιστικής μοντελοποίησης έχει αναπτυχθεί [8, 9].

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας του TOMGRO, ενός προσομοιώματος καλλιέργειας τομάτας, στην πρόβλεψη της ανάπτυξης σποροφύτων τομάτας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Το πείραμα διήρκησε από 23 Φεβρουαρίου έως 19 Μαρτίου 2007 και πραγματοποιήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, σε τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο έκτασης 300 m² με κάλυψη από διπλό φύλλο πολυαιθυλενίου στην οροφή και γυαλί στις πλευρές. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου ήταν: μήκος 30 m, πλάτος 10 m, ύψος ορθοστάτη 2.9 m, ύψος κορφιά 4.1 m.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων γινόταν με αερόθερμο και επιδαπέδιους πλαστικούς σωλήνες. Ο αερισμός των θερμοκηπίων γινόταν με τη βοήθεια παραθύρων τοποθετημένων στα πλάγια και την οροφή του θερμοκηπίου τα οποία άνοιγαν αυτόματα όταν η θερμοκρασία ξεπερνούσε τους 28°C. Η μέση θερμοκρασία νύχτας ήταν 19,4°C και η μέση θερμοκρασία ημέρας ήταν 25°C.

Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε δίσκους σποράς μεγέθους 60 x 80 cm. Ο κάθε δίσκος είχε 150 φυτά, που αντιστοιχεί σε περίπου 312 φυτά/m². Η άρδευση γινόταν σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να υπάρχει επάρκεια εφοδιασμού των φυτών με νερό και η λίπανση της καλλιέργειας γινόταν δύο φορές την εβδομάδα με διαφυλλικό λίπασμα 20-20-20 που περιείχε και τα απαραίτητα μικροστοιχεία.

2.2 Το προσομοίωμα τομάτας TOMGRO

Το TOMGRO αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της ανάπτυξης ποικιλιών τομάτας ακαθορίστου μήκους βλαστού. Η πρώτη έκδοση του εμφανίστηκε το 1993. Σήμερα, το TOMGRO βρίσκεται στην 3^η έκδοση του και έχει χρησιμοποιηθεί και επιβεβαιωθεί σε αρκετές εργασίες για καλλιέργεια τομάτας. Το προσομοίωμα για τον υπολογισμό της δέσμευσης CO₂ βασίζεται στην εξίσωση του Acocck. Η εξίσωση το Acocck θεωρείται επαρκής όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της παραγωγής μιας καλλιέργειας [10]. Ο υπολογισμός της δέσμευσης CO₂ πραγματοποιείται σε χρονικά διαστήματα μίας ώρας και η παραγόμενη ποσότητα CH₂O αθροίζεται. Στο τέλος της ημέρας γίνεται η κατανομή των προϊόντων της αφομοίωσης. Το TOMGRO χωρίζει την καλλιέργεια σε φυσιολογικές κλάσεις, ο καθορισμός των οποίων έχει γίνει εμπειρικά. Σε μία φυσιολογική κλάση ανήκουν όργανα με την ίδια περίπου φυσιολογική ηλικία.

Αρχικά υπολογίζεται η ζήτηση (sink strength) των διαφόρων οργάνων ανά φυσιολογική κλάση και στη συνέχεια προχωράει γίνεται η κατανομή με βάση το βαθμό κάλυψης της ζήτησης. Εξαίρεση αποτελεί το ριζικό σύστημα, η αύξηση του οποίου αντιμετωπίζεται επιφανειακά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πρώτη έκδοση του προσομοιώματος με κάποιες τροποποιήσεις ώστε να ταιριάζει στην καλλιέργεια σπορόφυτων τομάτας. Οι τροποποιήσεις έγιναν διότι τα σπορόφυτα δεν διαθέτουν άνθη και καρπούς. Επίσης τα ηλικιωμένα φύλλα που διαθέτουν είναι 3-4 εβδομάδων, οπότε δεν υπάρχει μείωση απόδοσης λόγω γήρανσης ή θανάτου βλαστικών οργάνων. Έτσι αφαιρέθηκαν οι εξισώσεις και τμήματα εξισώσεων που σχετίζονταν με τα άνθη, τους καρπούς και τον ρυθμό γήρανσης και θανάτου των φύλλων. Τέλος οι φυσιολογικές κλάσεις μειώθηκαν σε πέντε, από είκοσι του αρχικού προσομοιώματος, καθώς η χρονική διάρκεια μιας καλλιέργειας σπορόφυτων και ο βαθμός ανάπτυξης τους είναι μικρότερος. Οι τιμές των διάφορων φυσιολογικών και στατιστικών σταθερών έμειναν ως είχαν.

2.3 Οι μετρήσεις

Σε σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων κάθε 10 λεπτά (μέτρηση κάθε 30 δευτερόλεπτα) καταγραφόταν η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα καθώς και η ένταση της ακτινοβολίας στα τρία τμήματα του θερμοκηπίου.

Παράλληλα, με τη χρήση ενός φορητού φασματοφωτόμετρου, ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν μέτρηση της φασματικής κατανομής της προσπίπτουσας στα φυτά ακτινοβολίας για τα μήκη κύματος από 300 έως 1100 nm.

Τέλος, κάθε εβδομάδα, επιλέγονταν τυχαία 25 φυτά τμήμα του θερμοκηπίου-μεταχείριση και καταγραφόταν το ύψος και πλάτος των φυτών, ο αριθμός των κόμβων, το μήκος των μεσογονατίων διαστημάτων, το μήκος και πλάτος του 1^{ου} φύλλου και η φυλλική επιφάνεια, καθώς και το χλωρό και ξηρό βάρος των βλαστών, των φύλλων και του ριζικού συστήματος

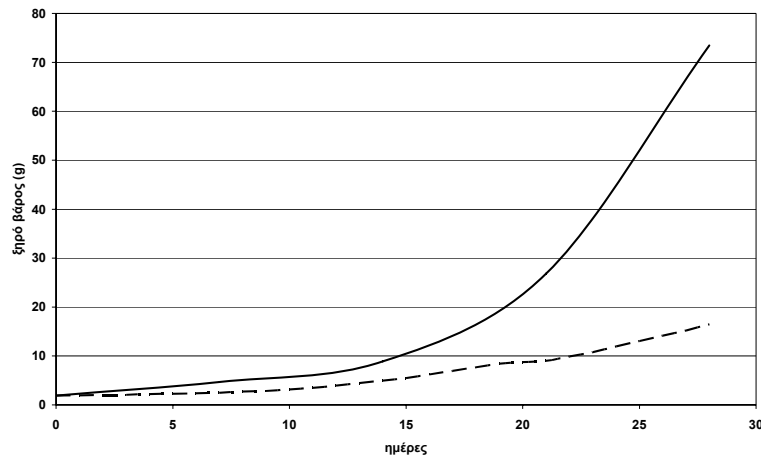
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και συγκέντρωσης CO₂ εντός του θερμοκηπίου, από τις 19 Φεβρουαρίου έως τις 19 Μαρτίου. Με βάση τις τιμές που έδωσε το προσομοίωμα για το ξηρό βάρος (Σχήμα 1) διαπιστώθηκε ότι απέτυχε να προβλέψει την αύξηση του ξηρού βάρους, υποεκτιμώντας την τελική τιμή καθώς την προέβλεψε ίση με περίπου το 1/4 της πραγματικής. Στα πρώτα στάδια (δύο πρώτες εβδομάδες) η προβλεπόμενη τιμή αντιστοιχούσε περίπου στο 50% της πραγματικής. Στη συνέχεια η διαφορά μεγαλώνει καθώς η αύξηση των σπορόφυτων είναι εκθετική και στα τελευταία στάδια ο ρυθμός αύξησης μεγαλώνει. Σε κάποιο βαθμό αυτό οφείλεται στη περιορισμένη ζήτηση των μεταβολιτών από τα βλαστικά μέρη, με αποτέλεσμα η καλλιέργεια να χρησιμοποιεί λιγότερα από ό,τι, σύμφωνα με το προσομοίωμα, είναι σε θέση να παράγει. Η περιορισμένη ζήτηση, εν μέρη, οφείλεται στη χαμηλή τιμή του δυνητικού ρυθμού αύξησης των φύλλων που χρησιμοποιεί το προσομοίωμα. Κατά μέσο όρο ο ρυθμός αύξησης της καλλιέργειας ήταν 10πλάσιος του ρυθμού αύξησης που δίνεται ως δυνητικός ρυθμός από το προσομοίωμα (Πίνακας 1). Αρχικά, και έως τις πρώτες δύο εβδομάδες, ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος, ενώ από την τρίτη εβδομάδα και ύστερα αυξάνεται εκθετικά, φτάνοντας να είναι τριακονταπλάσιος του θεωρούμενου ως δυνητικού από το προσομοίωμα.

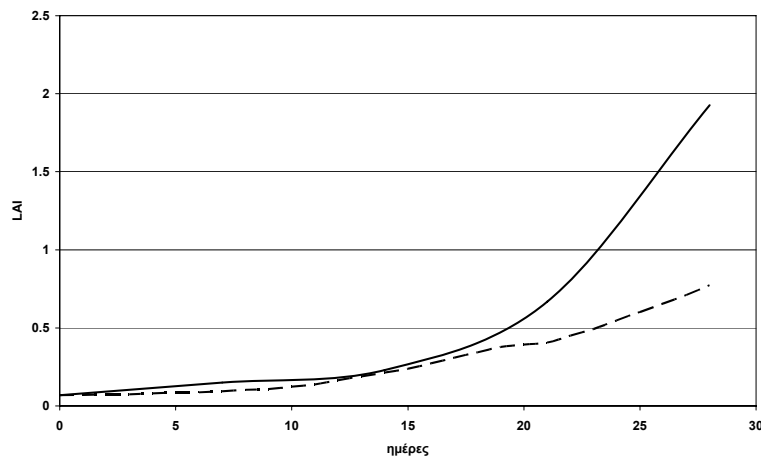
Πίνακας 1. Δυνητικός ρυθμός αύξησης και πραγματικός ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας (%). Για την περίπτωση των μετρήσεων το 100% αναλογεί σε 30 ημέρες

	10%	20%	30%	40%	50%
	60%	70%	80%	90%	100%
Δυνητικός	0,007	0,0016	0,0031	0,0032	0,0032
	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0
Πραγματικός	0,00075	0,0014	0,0026	0,0048	0,0090
	0,01688	0,0313	0,0583	0,1087	0,2027

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας επίσης υποεκτιμάται. Αν ωστόσο εξετάσουμε το δείκτη φυλλικής επιφάνειας συναρτήσει του ξηρού βάρους των φύλλων παρατηρούμε ότι διαφέρει κατά περίπου 30% από τη φυλλική επιφάνεια της πραγματικής καλλιέργειας με το ίδιο ξηρό βάρος. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το προσομοίωμα υπερεκτιμά την ειδική φυλλική επιφάνεια, κάτι το οποίο σημαίνει ότι θα έπρεπε να υποεκτιμά και τη φυλλική επιφάνεια. Η τιμή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας όπως υπολογίζεται από το προσομοίωμα είναι περίπου 0,06 m²·g⁻¹ καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, όταν στην πραγματικότητα η τιμή του αρχικά είναι 0,06 m²·g⁻¹ φθίνοντας τελικά προς τη τιμή 0,04 m²·g⁻¹.



Σχήμα 1. Συνολικό ξηρό βάρος. Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η μετρημένη τιμή και με τη διακεκομμένη γραμμή η υπολογισμένη τιμή

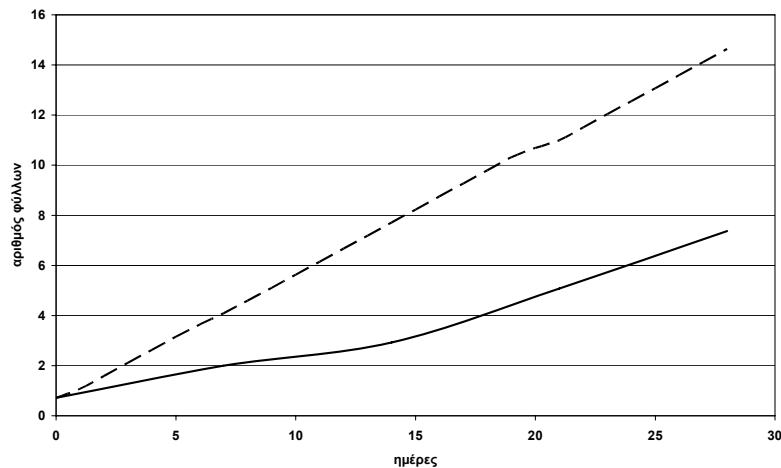


Σχήμα 2. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας. Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η μετρημένη τιμή και με τη διακεκομμένη γραμμή η υπολογισμένη τιμή.

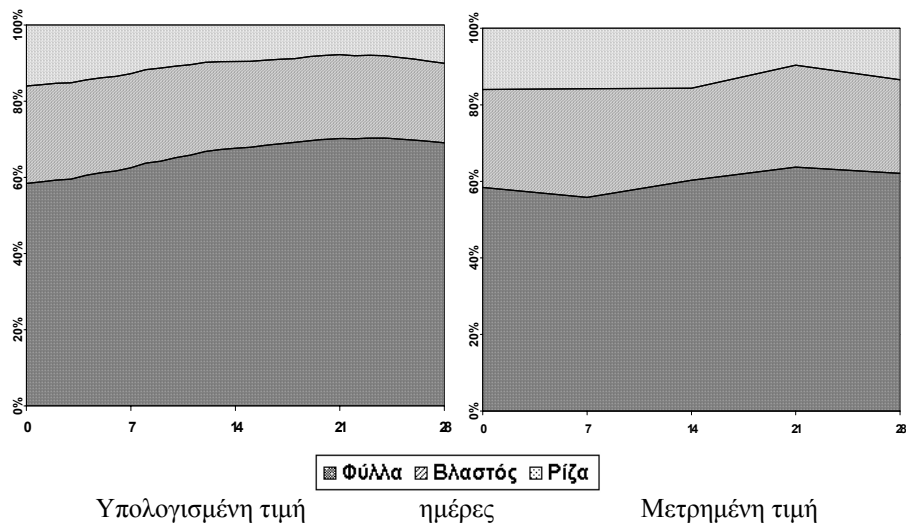
Ο αριθμός των φύλλων, αντίθετα με τα παραπάνω, υπερεκτιμάται (Σχήμα 3). Ο τελικός αριθμός φύλλων που προβλέπεται από το προσομοίωμα είναι διπλάσιος από τον πραγματικό. Ο αριθμός των φύλλων μπορεί να επηρεαστεί από πλήθος παραγόντων, ωστόσο ιδιαίτερη επίδραση φαίνεται να έχει ο δυνητικός ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων που στο προσομοίωμα έχει τιμή 0,55 φύλλα/ ημέρα. Μια δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη σχεδόν γραμμική, ανεξάρτητη της αύξησης του ξηρού βάρους, αύξηση του αριθμού των φύλλων. Στην πραγματικότητα ο ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων επηρεάζεται από το ρυθμό αύξησης του ξηρού βάρους.

Η κατανομή του ξηρού βάρους στα διάφορα μέρη του φυτού φαίνεται να είναι το μόνο μέγεθος που πλησιάζει στις μετρήσεις, αν και στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται να υπάρχει σημαντική διαφορά (Σχήμα 4). Συγκρίνοντας όμως το λόγο ξηρό βάρος φύλλων προς ξηρό βάρος βλαστού υπάρχει κάποια συμφωνία. Το προσομοίωμα όσο προχωράει η καλλιέργεια αλλάζει το λόγο ξηρού βάρους φύλλων προς ξηρό βάρος βλαστών προς όφελος των φύλλων. Από 2,28 που είναι η αρχική τιμή καταλήγει στο

3,31. Στην πραγματικότητα ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 2,0-2,5. Επίσης το προσομοίωμα αγγίζει επιφανειακά την κατανομή ξηράς ουσίας στο ριζικό σύστημα, ενώ παράλληλα περιορίζει το ποσοστό του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος στο 9% του συνολικού ξηρού βάρους. Αυτό ισχύει για μια ανεπτυγμένη καλλιέργεια, ωστόσο στην περίπτωση της καλλιέργειας σπορόφυτων τομάτας το ποσοστό του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος είναι 10-15% του συνολικού ξηρού βάρους, όπως εξάλλου βρέθηκε και από τις πειραματικές.



Σχήμα 3. Αριθμός φύλλων ανά φυτό. Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η μετρημένη τιμή και με τη διακεκομμένη γραμμή η υπολογισμένη τιμή.



Σχήμα 4. Κατανομή ξηράς ουσίας στα φύλλα, το βλαστό και το ριζικό σύστημα

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τις μετρήσεις που έγιναν και τα αποτελέσματα που έδωσε η τροποποιημένη έκδοση του TOMGRO (βασισμένη στην 1^η έκδοση), το προσομοίωμα απέτυχε να

προβλέψει σωστά την ανάπτυξη της καλλιέργειας σπορόφυτων τομάτας, δίνοντας τιμές που απέκλιναν σημαντικά από τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές.

Αυτό οφείλεται στις σημαντικές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ μιας παραγωγικής καλλιέργειας και μιας καλλιέργειας σπορόφυτων. Τα σπορόφυτα αναπτύσσονται εκθετικά σε σχέση με το χρόνο, ενώ μια ανεπτυγμένη καλλιέργεια αναπτύσσεται γραμμικά. Επίσης ο μέσος δυνητικός ρυθμός αύξησης των σπορόφυτων είναι μεγαλύτερος από το δυνητικό ρυθμό αύξησης μιας παραγωγικής καλλιέργειας.

Ένα δεύτερο σημείο που χρίζει σημαντικής βελτίωσης είναι ο υπολογισμός της ειδικής φυλλικής επιφάνειας, όπως επίσης και του λόγου ξηρού βάρους μίσχων προς ξηρού βάρους φύλλων.

Διόρθωσης επίσης χρίζει και ο συντελεστής μείωσης του φωτός εντός της φυλλοστιβάδας για το PAR. Στις καλλιέργειες σπορόφυτων τα φύλλα δεν σκιάζονται παρά μονάχα προς το τέλος της καλλιέργειας, όπου και πάλι ο βαθμός σκίασης των κατώτερων φύλλων είναι μικρός.

Τέλος ο αριθμός των φυσιολογικών κλάσεων και ο αριθμός των μελών ανά φυσιολογική κλάση επηρεάζουν τη συμπεριφορά του προσομοιώματος. Ο καθορισμός τους, όπως αναφέρθηκε, στο αρχικό προσομοίωμα έχει γίνει εμπειρικά και στο τροποποιημένο που χρησιμοποιήθηκε απλώς μειώθηκε ο αριθμός των κλάσεων. Ενδεχομένως να είναι απαραίτητος ο επανακαθορισμός του αριθμού των κλάσεων και κυρίως του αριθμού των μελών μιας κλάσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tremblay Nicolas and André Gosselin, 1998, Effect of Carbon Dioxide Enrichment and Light, HortTechnology October - December 1998 8(4).
2. Goudriaan J. and H.H. van Laar, 1994, Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook with Exercises, Kluwer Academic Publishers, pp. 239.
3. Pucheta A. J., C. Schugurensky, R. Fullana, H. Patiño, B. Kuchen, 2006, Optimal greenhouse control of tomato-seedling crops, Computers and Electronics in Agriculture 50 (2006) 70–82.
4. Dayan E., H. van Keulen, J. W. Jones, I. Zipori, D. Shmuel and H. Challa, 1993b, Description of the model In: TOMGRO – a greenhouse-tomato simulation model, Editors: H. van Keulen and E. Dayan, 1993, pp. 3-14.
5. Gutman O.P., P.O. Lindberg, I. Ioslovich, I. Seginer, 1993, A Non-Linear Optimal Greenhouse Control Problem Solved by Linear Programming, J. agric. Engng Res. (1993) 55, 335-351.
6. Heuvelink E., 1995, Dry Matter Production in a Tomato Crop : Measurements and Simulation, Annals of Botany 75: 369-379.
7. Plentinger M. C. and F.W.T. Penning de Vries (editors), 1996, CAMASE: Register of Agro-ecosystems Models, DLO-Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility (AB-DLO).
8. Weiss R. E., 2005. Modeling longitudinal data. Springer.
9. Wu H., Zhang J. T., 2006. Nonparametric regression methods for longitudinal data analysis: Mixed effects modeling approaches. Wiley.
10. Pachepsky B. L., J. D. Haskett and B. Acock, 1996, An Adequate Model of Photosynthesis - I Parameterization, Validation and Comparison of Models, Agricultural Systems 50 (1996) 209-225.

22(7)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΓΟΝΙΚΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΓΓΟΥΡΙΟΥ

Κ. Κίττας^{1a, 2}, Ν. Κατσούλας^{1b}, Χ. Μανωλαράκη¹, Θ. Μπαρτζάνας²

¹ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας, Φυτ. Παρ. & Αγρ. Περιβάλλοντος, Εργ.
Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, Ν. Ιωνία
Μαγνησίας, 38446, Βόλος, ^ackittas@uth.gr, ^bnkatsoul@uth.gr

² Κέντρο Έρευνας, Τεχν. & Ανάπτ. Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης
Αγροοικοσυστημάτων, Τεχν. Πάρκο Θεσσαλίας, 1^η Βιομ. Περιοχή, 38500, Βόλος,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έγιναν μετρήσεις σε τρία όμοια θερμοκήπια τα οποία ήταν καλυμμένα: το πρώτο με φύλλο πολυαιθυλενίου (PE) με αντισταγονικές (AD) και αντιομιχλικές (AF) ιδιότητες, το δεύτερο με φύλλο PE με AD ιδιότητες και το τρίτο (μάρτυρας), με κοινό φύλλο PE, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των αντισταγονικών φύλλων στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην ανάπτυξη και παραγωγή υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού. Ενώ η παραγωγή ήταν παρόμοια και στα τρία θερμοκήπια, βρέθηκε ότι η σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο με το AD-AF φύλλο παρουσίασε τις μικρότερες τιμές, κάτι που οδήγησε σε μείωση των ψεκασμών που πραγματοποιήθηκαν στο θερμοκήπιο αυτό.

EFFECTS OF ANTI-DRIP COVER MATERIALS ON THE MICROCLIMATE OF A GREENHOUSE CULTIVATED WITH A CUCUMBER CROP

C. Kittas^{1a, 2}, N. Katsoulas^{1b}, Ch. Manolaraki¹, T. Bartzanas²

¹ University of Thessaly, Dept. of Agriculture, Crop Production & Rural Envir., Lab. of
Agricultural Construct. & Env. Cont., Fytokou St., 38446, N. Ionia, Magnesia, Greece

² Centre for Research and Technology, Institute of Technology and Agricultural
Ecosystems, Technology Park of Thessaly, 1st Ind. Area of Volos, 38500 Volos, Greece

ABSTRACT

Measurements were carried out under three greenhouses covered by different cover materials: the first was covered by a PE film with anti-drip (AD) and anti-fog (AF) properties, the second covered by a PE film with AD properties and the last covered by a common PE film, in order to study the effects of the AD films on greenhouse microclimate and on growth and production of a hydroponic cucumber crop. The results showed that the crop production was not affected by the different films. However, the air relative humidity levels were lower under the AD-AF greenhouse, something that led to less needs for fungicides spraying under that greenhouse.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου είναι τα υψηλά επίπεδα υγρασίας που παρατηρούνται στο εσωτερικό τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας σε συνδυασμό με χαμηλές θερμοκρασίες αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος οδηγούν σε συμπύκνωση των υδρατμών στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος του θερμοκηπίου, οι οποίοι συνήθως πέφτουν με τη μορφή σταγόνων νερού στην επιφάνεια της καλλιέργειας δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη και εξάπλωση διαφόρων μυκητολογικών ασθενειών.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος οι παραγωγοί είτε αφυγραίνουν το θερμοκήπιο (με ταυτόχρονη θέρμανση και αερισμό), ή/και χρησιμοποιούν χημικά φυτοπροστατευτικά προϊόντα. Η απαίτηση όμως των καταναλωτών για προϊόντα απαλλαγμένα από χημικά υπολείμματα, η οποία γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη, σε συνδυασμό με την αύξηση των τιμών των καυσίμων, οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων για τη ρύθμιση των υψηλών επιπέδων υγρασίας. Μία τέτοια μέθοδος είναι η χρήση αντισταγονικών φύλλων κάλυψης των θερμοκηπίων.

Για τα αντισταγονικά υλικά κάλυψης η μέχρι τώρα έρευνα επικεντρώθηκε στις οπτικές ιδιότητες των υλικών. Οι Geola et al [1] χρησιμοποίησαν ένα πειραματικό θερμοκήπιο μικρής κλίμακας έτσι ώστε να διερευνήσουν την επίδραση ενός αντισταγονικού υλικού στη διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι ίδιοι ερευνητές μελέτησαν και τη γήρανση του αντισταγονικού υλικού. Η αντοχή και η αποτελεσματικότητα των αντισταγονικών υλικών μελετήθηκαν από άλλους ερευνητές [2,3] προσδιορίζοντας διάφορες παραμέτρους, όπως τη μεταβολή των ειδικών προσθέτων που προσδίδουν στο υλικό τις αντισταγονικές ιδιότητες με το χρόνο, της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ των σταγόνων νερού και της επιφάνειας του υλικού κάλυψης και του μεγέθους των σταγόνων. Τέλος η επίδραση των συμπυκνώσεων στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος στη διαπερατότητα του υλικού κάλυψης, στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια μελετήθηκε από διάφορους ερευνητές [4,5,6].

Όσον αφορά το σύστημα αφύγρανσης, έχουν γίνει εργασίες τόσο για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλασικού συστήματος θέρμανσης- αερισμού, όσο και για την ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων αφύγρανσης με διαφορετική αρχή λειτουργίας. Οι εργασίες βελτιστοποίησης της διαχείρισης του συστήματος αφορούσαν κυρίως τη μοντελοποίηση του ισοζυγίου υδρατμών του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια τον υπολογισμό των βέλτιστων ορίων υγρασίας [7,8,9]. Οι εργασίες οι οποίες αναφέρονται στην εφαρμογή κάποιου συστήματος διαφορετικού από το κλασικό σύστημα αφύγρανσης αναφέρονται κυρίως στην αφύγρανση: α) με τη χρησιμοποίηση κάποιου υγροσκοπικού υλικού [10], β) με χρήση αντλιών θερμότητας [11] και γ) την εξαναγκασμένη εναλλαγή του αέρα με τη βοήθεια συστήματος ανεμιστήρων [9]. Πρόσφατα, οι Kittas and Bartzanas [12], μελέτησαν την επίδραση διαφόρων τύπων ανοιγμάτων αερισμού στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής για αφύγρανση στο θερμοκήπιο.

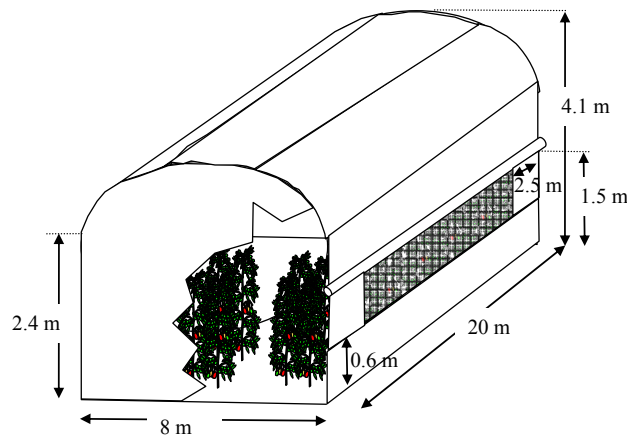
Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν εργασίες στις οποίες να διερευνάται η επίδραση των αντισταγονικών υλικών κάλυψης, στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, στην καλλιέργεια και στην εμφάνιση και ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Έτσι, στην εργασία αυτή διερευνάται πειραματικά η επίδραση δύο αντισταγονικών φύλλων κάλυψης των θερμοκηπίων στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην ανάπτυξη και παραγωγή υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Τα πειράματα έγιναν κατά τη χειμερινή περίοδο 2006-07, στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, σε τρία όμοια τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια έκτασης 160 m² το καθένα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θερμοκηπίων ήταν: μήκος 20 m, πλάτος 8 m, ύψος ορθοστάτη 2.4 m, ύψος κορφιά 4.1 m. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό. Ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και καλύφθηκε με κοινό πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου (PE). Τα άλλα δύο θερμοκήπια καλύφθηκαν το πρώτο με φύλλο PE με αντισταγονικές (AD) και αντιομιχλικές (AF) ιδιότητες (AD+AF) και το δεύτερο με φύλλο PE με AD ιδιότητες. Το πάχος των φύλλων ήταν 0.18 mm της βιομηχανίας «Πλαστικά Κρήτης ΑΒΕΕ».

Η θέρμανση των θερμοκηπίων γινόταν με αερόθερμα και επιδαπέδιους σωλήνες θέρμανσης, με τη θερμοκρασία του αέρα να διατηρείται στους 16°C κατά τη διάρκεια της νύχτας και τους 19°C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο αερισμός των θερμοκηπίων γινόταν με τη βοήθεια παραθύρων τοποθετημένων στα πλάγια του θερμοκηπίου τα οποία άνοιγαν αυτόματα όταν η θερμοκρασία του αέρα ξεπερνούσε τους 23°C.



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση ενός εκ των τριών πειραματικών θερμοκηπίων.

Στο θερμοκήπιο εγκαταστάθηκε το Σεπτέμβριο του 2006, υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού (cv. *Cucumis sativus*) σε υπόστρωμα περλίτη. Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε τέσσερις διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης 0.33 m επί της γραμμής και 0.75 m μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς, με πυκνότητα 2.1 φυτά/m². Η άρδευση και λίπανση της καλλιέργειας γινόταν αυτόματα με σύστημα ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το κλάδεμα και η διαμόρφωση της καλλιέργειας γινόταν σύμφωνα με την τεχνική που ακολουθείται από τους παραγωγούς.

2.2 Οι μετρήσεις

Σε σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (model DL-3000, Delta-T devices, Cambridge, U.K.) κάθε 10 λεπτά (μέτρηση κάθε 30 δευτερόλεπτα) καταγραφόταν:

Έξω από το θερμοκήπιο: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα (model H08-032-08, HOBO instruments, Bourne, MA, U.S.A.) και η ολική ηλιακή ακτινοβολία (model CM-6, Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands).

Μέσα στα θερμοκήπια: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα (model H08-032-08, HOBO instruments, Bourne, MA, U.S.A.), η ολική ηλιακή ακτινοβολία (model CM-6, Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands), η θερμοκρασία του καλύμματος του θερμοκηπίου (thermistors), η διαπνοή των φυτών (διάταξη λυσιμέτρου) και η ενέργεια που απέδιδε το σύστημα θέρμανσης.

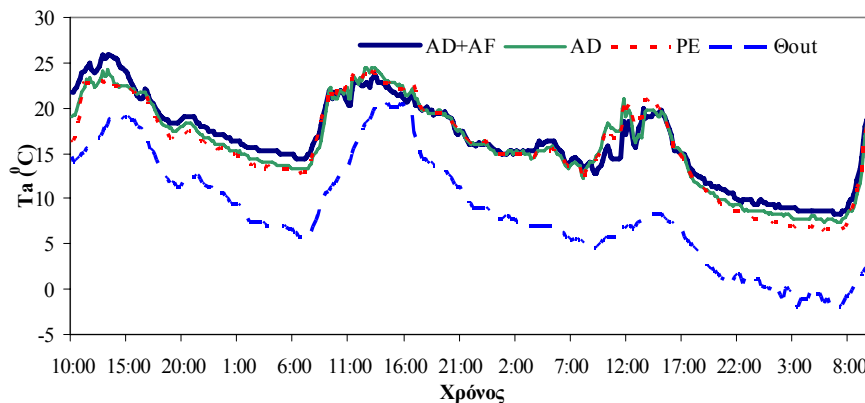
Επιπλέον, καταγραφόταν ο αριθμός, το βάρος και το μέγεθος των καρπών που συγκομίζονταν από κάθε θερμοκήπιο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι μετρήσεις που έγιναν από το Σεπτέμβριο του 2006 έως τον Ιανουάριο του 2007 επέτρεψαν τη μελέτη και το χαρακτηρισμό των τριών θερμοκηπίων από πλευράς συνθηκών ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και υγρασίας καθώς επίσης και τη μελέτη της επίδρασης των δύο αντισταγονικών υλικών κάλυψης στην παραγωγή της καλλιέργειας αγγουριού και την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν την περίοδο από 1 έως 3 Νοεμβρίου 2006, τρεις χαρακτηριστικές ημέρες της περιόδου.

3.1 Θερμοκρασία αέρα

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η πορεία της θερμοκρασίας του αέρα (T_a) εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 4/11/06. Φαίνεται ότι στα τρία θερμοκήπια η πορεία της θερμοκρασίας του αέρα ήταν παρόμοια και υψηλότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία που επικρατούσε στην περιοχή. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας (18:00 – 06:00), για τις ημέρες που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή ήταν 14.5 °C, 14 °C και 13 °C για τα θερμοκήπια AD+AF, AD και PE, αντίστοιχα.

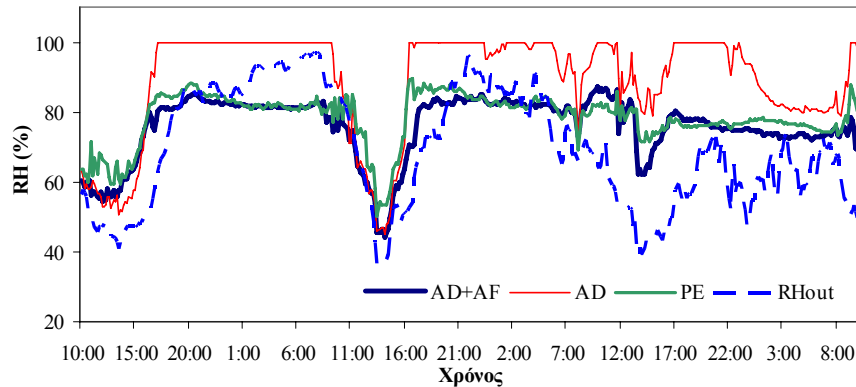


Σχήμα 2. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα (T_a) εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 4/11/06.

3.2 Σχετική υγρασία αέρα

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 4/11/06. Η σχετική υγρασία του αέρα στα θερμοκήπια AD+AF και PE κυμαίνονταν σε παρόμοια επίπεδα, ενώ η σχετική υγρασία στο AD θερμοκήπιο διατηρούνταν σε πολύ υψηλά επίπεδα (90%-100%) τις ώρες που τα παράθυρα του θερμοκηπίου ήταν κλειστά. Η σχετική υγρασία φαίνεται ότι μειώνονταν κατά τις μεσημεριανές ώρες, όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

ξεπερνούσε τους 23 °C, θερμοκρασία πάνω από την οποία γινόταν αερισμός του θερμοκηπίου. Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας (18:00 – 06:00), για τις ημέρες που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή ήταν 80%, 97% και 81% για τα θερμοκήπια AD+AF, AD και PE, αντίστοιχα.



Σχήμα 3. Πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα (RH) εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 4/11/06.

Στο θερμοκήπιο AD τις νυχτερινές ώρες παρατηρούνταν υψηλή σχετική υγρασία (>93%) συνεχόμενα για αρκετές ώρες. Παρόλα αυτά δεν παρατηρήθηκαν προσβολές από *Botrytis cinerea* στην καλλιέργεια, καθώς σύμφωνα με τους Koerner & Challa [13] για την ανάπτυξη του βοτρυτή απαιτείται σχετική υγρασία >93% για περισσότερο από 48 ώρες συνεχόμενα, κάτι το οποίο δεν γινόταν λόγω του καλού αερισμού του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο οποίος γινόταν ακόμα και όταν η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα ήταν αρκετά χαμηλή.

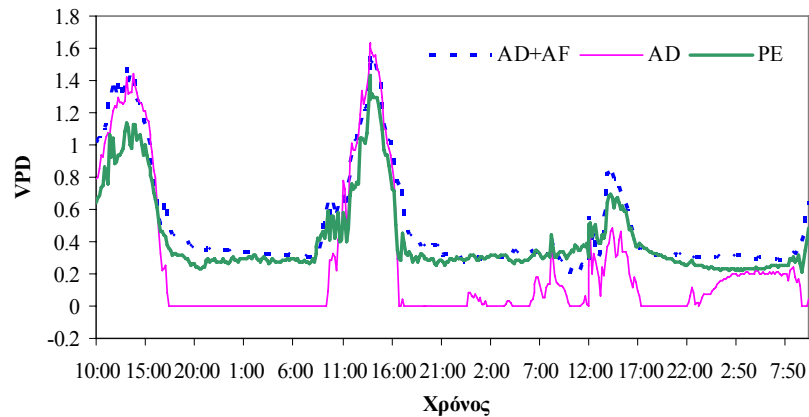
3.3 Έλλειμμα κορεσμού του αέρα

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 3/11/06.

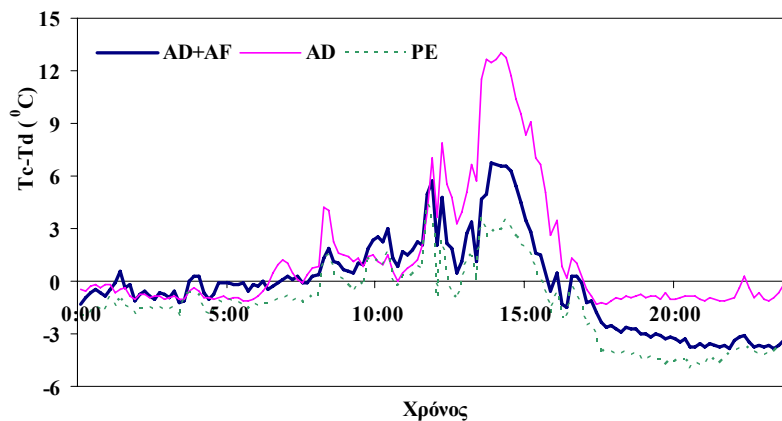
Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD) στα θερμοκήπια AD+AF και PE κυμαίνονταν σε παρόμοια επίπεδα, ενώ στο AD θερμοκήπιο διατηρούνταν σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα (0-0.2 kPa), με εξαίρεση τις ώρες όπου τα παράθυρα των θερμοκηπίων ήταν ανοιχτά, περίοδος κατά την οποία το VPD αυξανόταν και στα τρία θερμοκήπια. Έχει παρατηρηθεί ότι χαμηλά επίπεδα VPD (0-0.2 kPa) οδηγούν σε αύξηση του ρυθμού αύξησης των φύλλων και σε έλλειψη ασβεστίου στους καρπούς [14,15]. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της εργασίας αυτής.

3.4 Συμπύκνωση στο κάλυμμα

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος της οροφής (T_c) και της θερμοκρασίας δρόσου του αέρα (T_d) στις 3/11/07.



Σχήμα 4. Έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD) εντός και εκτός των θερμοκηπίων από 1/11/06 έως 3/11/06.



Σχήμα 5. Διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος (T_c) και της θερμοκρασίας κορεσμού (T_d) στις 3/11/07.

Φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας (8:00-16:00) η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος και της θερμοκρασίας δρόσου του αέρα είναι θετική και συνεπώς δεν δημιουργούνται υγροποιήσεις στις επιφάνειες των καλυμμάτων των τριών θερμοκηπίων. Αντίθετα τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος και της θερμοκρασίας δρόσου του αέρα είναι αρνητική με αποτέλεσμα τη δημιουργία υγροποιήσεων στην επιφάνεια των καλυμμάτων και στα τρία θερμοκήπια. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος (T_c) και της θερμοκρασίας κορεσμού (T_d) στο θερμοκήπιο PE είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα θερμοκήπια, υποδηλώνοντας έτσι μεγαλύτερο ρυθμό υγροποιήσεων στην επιφάνεια του καλύμματος. Η έντονη υγροποίηση στην επιφάνεια του καλύμματος οδήγησε στην έντονη δημιουργία σταγόνων οι οποίες έπεφταν με τη σειρά τους στην επιφάνεια της καλλιέργειας, κάτι που σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα υγρασίας οδήγησε και στην εμφάνιση ωιδίου και περονόσπορου σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τα άλλα δύο θερμοκήπια. Παράλληλα, στο AD θερμοκήπιο, ακόμα και αν δεν υπήρχε πτώση σταγόνων από το κάλυμμα στην επιφάνεια της καλλιέργειας, τα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας που παρατηρήθηκαν οδήγησαν επίσης στην ανάπτυξη ωιδίου. Το

γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εφαρμογή περίπου διπλάσιων ψεκασμών με φυτοπροστατευτικά στα θερμοκήπια PE και AD σε σχέση με το AD+AF θερμοκήπιο. Έτσι, η χρήση του νέου AD+AF φύλλου κάλυψης των θερμοκηπίων οδήγησε σε μείωση των ψεκασμών στο θερμοκήπιο και στην παραγωγή «καθαρότερων» προϊόντων με λιγότερα χημικά υπολείμματα.

3.4 Επίδραση στην καλλιέργεια-παραγωγή

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου καταγραφόταν ο αριθμός παραγόμενων καρπών ανά θερμοκήπιο καθώς και το βάρος των παραγόμενων καρπών (πίνακας 2). Παρά το γεγονός ότι οι κλιματικές συνθήκες, ιδιαίτερα όσον αφορά τη σχετική υγρασία του αέρα διέφεραν μεταξύ των τριών θερμοκηπίων, η παραγωγή της καλλιέργειας δεν επηρεάστηκε καθώς βρέθηκε ότι το μέσο βάρος των καρπών και ο αριθμός των καρπών ανά m^2 δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών θερμοκηπίων.

Πίνακας 2. Μέσες τιμές βάρους καρπού και αριθμού καρπών κατά τη συγκομιδή (1/11/2006-18/12/2006). Ίδια γράμματα στην ίδια στήλη υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές για $p = 0.05$.

	Μέσο βάρος καρπού (kg ανά καρπό)	Παραγωγή (αριθμός καρπών m^{-2})
Θερμοκήπιο AD+AF	173.21 α	21.24 α
Θερμοκήπιο AD	146.72 α	19.34 α
Θερμοκήπιο PE	115.12 α	21.58 α

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι καθώς η θερμοκρασία του αέρα διατηρούνταν στα ίδια επίπεδα και στα τρία θερμοκήπια τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας ήταν σημαντικά διαφορετικά μεταξύ των τριών θερμοκηπίων. Τα μεγαλύτερα επίπεδα σχετικής υγρασίας παρατηρήθηκαν στο θερμοκήπιο με το AD φύλλο πολυαιθυλενίου ενώ ακολουθούσε το θερμοκήπιο με το PE φύλλο. Οι υγροποιήσεις που παρατηρήθηκαν στο θερμοκήπιο με το PE φύλλο κάλυψης οδηγούσαν στην πτώση σταγόνων νερού στην επιφάνεια της καλλιέργειας κάτι το οποίο οδήγησε σε ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Έντονη υγροποίηση αλλά χωρίς την πτώση σταγόνων στην επιφάνεια της καλλιέργειας παρατηρήθηκαν και στο θερμοκήπιο με το AD υλικό κάλυψης, κάτι το οποίο, σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας βοήθησε στην ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Βρέθηκε ότι η χρήση του AD+AF υλικού κάλυψης βοήθησε στη μείωση της ανάγκης ψεκασμών για μυκητολογικές ασθένειες στο μισό και στην παραγωγή «καθαρότερων» προϊόντων με λιγότερα χημικά υπολείμματα, ενώ δεν επηρέασε την παραγωγή της καλλιέργειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή έγινε στο πλαίσιο του έργου ΠΑΒΕΤ 2005: «Ανάπτυξη και αξιολόγηση αντισταγονικών φύλλων κάλυψης κατάλληλων για θερμοκήπια φιλικά στο περιβάλλον», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Πλαστικά Κρήτης Α.Β.Ε.Ε και τη Γ.Γ.Ε.Τ. και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και ειδικότερα το Ε.Τ.Π.Α.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Geoola et al 2004 Geoola, F., Kashti, Y., Levi, A., Brickman, R., 2004. Quality evaluation of anti-drop properties of greenhouse cladding materials. *Polymer Testing*, 23:755–761
2. Moens, F, 1991. The use of surface active additives as anti-fog agents in agricultural films. *Proceedings of the 23rd Agricultural Plastics Congress*, pp 188-195.
3. Schultz, W. Bartnig, K., 1996. Evaluation of the non-drip properties of greenhouse cladding films. *Plasticulture*, 96(3): 23–33.
4. Pieters, J.G., Deltour, J.M., Debruyckere, K.J., 1994. Condensation and static heat transfer through greenhouse covers during night. *Transactions of the ASAE*, 37(6): 195-1972.
5. Pieters, J.G., Deltour, J.M., 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *J. Agric. Engng Res.*, 68: 125-137.
6. Pollet I.V., Pieters J.G., 2000. Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials, Part 3: Results for Glass Plates and Plastic Films. *J. Agric. Engng Res.*, 77 (4): 419-428.
7. Jolliet O., 1993. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57:23-37.
8. Stanghellini C., de Jong T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76:129-148.
9. De Hallaux D., Gauthier L., 1998. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under Northern latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 35–42.
10. Peiper U.M., Levav N., Geoola F., Seginer I., 1987. Experimental evaluation and mathematical model of an hygroscopic greenhouse dehumidifier, *Final Research Report*. BARD Project I39082, Bet-Dagan, Israel 1987.
11. Boulard T., Baille A., Lagier J., Mermier M., Vanderschmitt E., 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44: 191-204.
12. Kittas, C., Brtzanas T., 2007. Greenhouse Microclimate and Dehumidification Effectiveness under Different Ventilators Configuration. *Energy and Buildings*, 42 (10): 3774-3784
13. Koerner O., Challa H., 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 39: 173-192.
14. Banuelos, G.S., Offerman, G.P., Seim, E.C., 1985. High relative humidity promotes blossom-end rot on growing tomato fruit. *HortScience* 20 (5): 894-895.
15. Bakker J.C., Welles G.W.H. and van Uffelen J.A.M., 1987. The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumbers. *Journal of horticultural Science* 62 (3): 363-370.