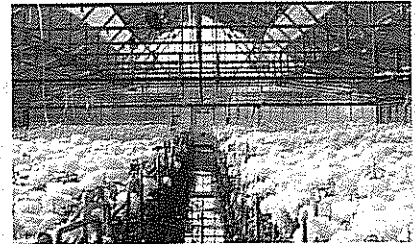
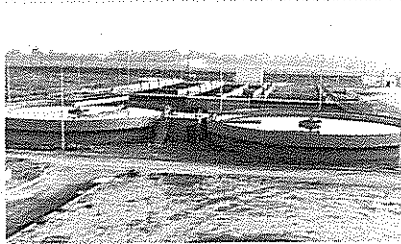
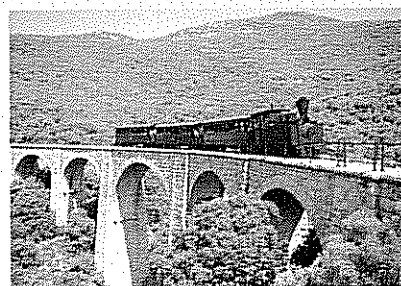




**ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΑΔΟΣ**



**ΠΡΑΚΤΙΚΑ
2ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**



**ΒΟΛΟΣ
28 - 30 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2000**

**ΥΠΟ ΤΗΝ ΑΙΓΙΔΑ ΤΟΥ ΤΜ. ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

Με τη συνδρομή: ΔΗΜΟΥ ΒΟΛΟΥ, ΓΕΩΤ.Ε.Ε., Τ.Ε.Ε. Μαγνησας

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ (Ε.Γ.Μ.Ε.)
HELLENIC SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (HelAgEng)

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

2ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Επιμέλεια Έκδοσης
Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη

ΒΟΛΟΣ
28 – 30 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2000

ΥΠΟ ΤΗΝ ΑΙΓΙΔΑ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Με τη συνδρομή : ΔΗΜΟΥ ΒΟΛΟΥ, ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ (ΓΕΩΤ.Ε.Ε.),
ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ (Τ.Ε.Ε.) Ν. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ

Η αναπαραγωγή των εργασιών έχει γίνει φωτογραφικά και την ευθύνη της εμφάνισης κάθε εργασίας έχουν οι συγγραφείς της.



Εκτύπωση • βιβλιοδεσία
ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΓΙΑΧΟΥΔΗ - ΓΙΑΠΟΥΛΗ
ΤΗΛ - FAX: 031 - 216.779
Κ. ΜΕΛΕΝΙΚΟΥ 15 • ΘΕΣΣ/ΝΙΚΗ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ) διανύει τον 8^ο χρόνο ύπαρξής της. Ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1993 με έδρα την Αθήνα και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (EurAgEng). Η επωνυμία της αποδίδεται στην αγγλική ως “Hellenic Society of Agricultural Engineers” (HelAgEng). Τα μέλη της σήμερα φθάνουν τα 121.

Το παρόν τεύχος των πρακτικών περιέχει 72 επιστημονικές ανακοινώσεις που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, το οποίο έλαβε χώρα στο Βόλο, στις 28-30 Σεπτεμβρίου 2000. Για την κρίση των εργασιών αυτών προς δημοσίευση στα Πρακτικά, εργάστηκαν μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής και άλλοι ειδικοί επιστήμονες. Το συνέδριο οργανώθηκε υπό την αιγίδα του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με τη συνδρομή του Δήμου Βόλου, του ΓΕΩΤ.Ε.Ε. και του Τ.Ε.Ε. Μαγνησίας.

Το Συνέδριο δίνει την ευκαιρία στο Επιστημονικό δυναμικό της χώρας μας να παρουσιάσει την πρόοδο της Επιστήμης και τις νέες μεθόδους προσέγγισης που αφορούν τη διαχείριση των υδάτινων και εδαφικών πόρων, τα γεωργικά μηχανήματα, τις αγροτικές κατασκευές, την επεξεργασία γεωργικών προϊόντων, την ενέργεια, τις νέες τεχνολογίες και ως επιστέγασμα όλων το περιβάλλον. Απευθύνεται σε πτυχιούχους θετικών επιστημών, οι οποίοι είτε λόγω μεταπτυχιακής εκπαίδευσης, είτε λόγω μακράς ενασχόλησης απέκτησαν γνώσεις σε ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω γνωστικά αντικείμενα.

Η συζήτηση και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από το Συνέδριο πιστεύουμε ότι θα εδραιώσουν το ρόλο του Γεωργικού μηχανικού στη χώρα μας. Εκφράζονται θερμές ευχαριστίες προς τα μέλη της Οργανωτικής και Επιστημονικής Επιτροπής του συνεδρίου, τους συγγραφείς και τους κριτές των εργασιών που αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο για την επιστημονικά αρτιότερη εμφάνιση του συνεδρίου.

Προς την Πρυτανεία την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, το Δήμαρχο Βόλου, το Νομάρχη Ν. Μαγνησίας καθώς και τους άλλους χορηγούς και εκθέτες απευθύνονται ειλικρινείς ευχαριστίες για την οικονομική ενίσχυση που προσέφεραν ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία το παρόν συνέδριο.

Βόλος, Σεπτέμβριος 2000

Καθηγήτρια, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή

Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ., Πρόεδρος
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Γέμτος Θ., Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ.
Δαναλάτος Ν., Λέκτορας Π.Θ.
Πρίντζος Ι., Πρόεδρος Τ.Ε.Ε. Ν. Μαγνησίας
Μανουόδης Ν., Γεωπόνος, Δ/νση Γεωργικής Ανάπτυξης Ν. Μαγνησίας
Καλφούντζος Δ., Ερευνητής ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.
Ντιούδης Π., Επίκ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Λάρισας
Σουφλιάς Κ., Γεωπόνος Περιφέρειας Θεσσαλίας
Βλειώρας Σ., Γεωπόνος, εκπρ. ΓΕΩΤ.Ε.Ε. Κεντρικής Ελλάδος
Στεργιοπούλου Σ., Γεωπόνος, Μ.Δ.Ε., Π.Θ.

Επιστημονική Επιτροπή

Ακριτίδης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αναστασιάδου - Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Γέμτος Θ., Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ.
Γιαννόπουλος Σ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Δαλέζιος Ν., Καθηγητής Π.Θ.
Δαναλάτος Ν., Λέκτορας Π.Θ.
Ζήσης Θ., Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Θεοδωρίκας Σ., Καθηγητής Π.Θ.
Καραμούζης Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραντούνιας Γ., Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κερκίδης Π., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Κορίτσης Σ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Λαμπρινός Γ., Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μήτσος Ι., Καθηγητής Π.Θ.
Μισοπολινός Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα - Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδάκης Γ., Επίκ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Πιτσιλής Π., Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Σακκάς Ι., Καθηγητής Δ.Π.Θ.
Σιδηράς Ν., Αναπλ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Τερζίδης Γ., Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Τζώρτζιος Σ., Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

Αναστασιάδου – Παρθενίου Ε., Αντωνόπουλος Β., Γέμτος Θ., Γεωργακάκης Δ., Γιαννόπουλος Σ., Δαλέζιος Ν., Δαναλάτος Ν., Δημητρίου Ι., Θεοδωρίκας Σ., Θεοδώρου Α., Καραθάνος Β., Καραμούζης Δ., Καραντούνιας Γ., Καρυώτης Θ., Κερκίδης Π., Κίττας Κ., Κοσμάς Κ., Λαμπρινός Γ., Μαρτζόπουλος Γ., Μήτσιος Ι., Μισοπολινός Ν., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Μπριασούλης Δ., Νάνος Γ., Νικήτα – Μαρτζοπούλου Χ., Παπαδάκης Γ., Παπαδόπουλος Α., Παπαμιχαήλ Δ., Παρισσόπουλος Γ., Πατέρας Δ., Πιτσιλής Π., Σακελλαρίου – Μακρραντωνάκη Μ., Σιδηράς Ν., Τερζίδης Γ., Τζιμόπουλος Χ., Τζώρτζιος Σ., Τσαντήλας Χ., Τσατσαρέλης Κ., Τσιακάρας Π.

Γραμματεία Συνεδρίου

Ροϊδη Φ., Αγγελάκη Α., τηλ. (0421) 74327, 74317
fax : (0421) 74324, 74317
e-mail : msak@arg.uth.gr

Χορηγοί του 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου της Ε.Γ.Μ.Ε.

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δήμος Βόλου
Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΓΕΩΤ.Ε.Ε.)
Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Τμήμα Μαγνησίας (Τ.Ε.Ε.)
ΑΓΡΕΚ, Θερμοκήπια
ΑΓΡΟΔΟΜΗ, Συστήματα Άρδευσης
PIPE LIFE HELLAS A.E., Βιομηχανία Πλαστικών Σωλήνων
Παντελής Παπαδόπουλος Α.Ε.Β.Ε., Μηχανήματα
Παύλος Ι. Κοντέλλης Α.Ε.Β.Ε., Εισαγωγές Μηχανημάτων – Αυτοκινήτων
Σύνδεσμος Εισαγωγέων – Αντιπροσώπων Μηχανημάτων
Ένωση Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων
Δημόσια Επιχείρηση Ύδρευσης & Αποχέτευσης Λάρισας (Δ.Ε.Υ.Α.Λ.)

Οικονομική ενίσχυση για το 2^ο Εθνικό Συνέδριο της Ε.Γ.Μ.Ε.

Νομαρχία Ν. Μαγνησίας
Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.)
NETAFIM A.E., Εξοπλισμός & Συστήματα Άρδευσης
MONSANTO ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε., Γεωργικά Φαρμακευτικά

Εκθέτες

SGIENTACT A.E., Περιβαλλοντικός & Εργαστηριακός Εξοπλισμός
ΕΒΟΞ Α.Ε. – ΑΦΟΙ ΖΗΚΑ Ο.Ε.
PIPE LIFE HELLAS A.E., Βιομηχανία Πλαστικών Σωλήνων
ΑΓΡΟΔΟΜΗ, Συστήματα Άρδευσης
ROTEX A.E., Αντλητικές Μηχανές
NAAN, Συστήματα Αρδεύσεων
Παντελής Παπαδόπουλος Α.Ε.Β.Ε., Μηχανήματα
Παύλος Ι. Κοντέλλης Α.Ε.Β.Ε., Εισαγωγές Μηχανημάτων – Αυτοκινήτων
Σύνδεσμος Εισαγωγέων – Αντιπροσώπων Μηχανημάτων
Ένωση Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

- Ακριτίδης Κ.
Αλεξίου Ι.
Αλεξοπούλου Ε.
Αναστασιάδου – Παρθενίου Ε.
Αντωνόπουλος Β.
Αρβανίτης Κ.
Αριστοπούλου Α.
Βασιλειάδης Λ.
Βλειώρας Δ.
Βλειώρας Σ.
Βύργλας Π.
Γαλάνης Μ.
Γάτσιος Φ.
Γέμτος Θ.
Γεωργίου Π.
Γεωργούσης Χ.
Γιαγλάρας Π.
Γιακουμάκης Σ.
Γιαννόπουλος Σ.
Γκόλια Ε.
Γούλας Χ.
Δαλέζιος Ν.
Δαναλάτος Ν.
Δέρκας Ν.
Δερμίσσης Β.
Δήμας Ε.
Δημητριάδης Α.
Δημητρίου Ι.
Δομενικιώτης Χ.
Ευθυμιάδης Π.
Ζαλίδης Γ.
Ζέρβα Γ.
Ζήσης Θ.
Θεοδώρου Α.
Θεοχάρης Μ.
Θεοχαρόπουλος Σ.
Καβαδάκης Γ.
Καβαλάρης Χ.
Κάβουρας Σ.
Καλαϊτζίδου – Πάικου Ν.
Καλφούντζος Δ.
Καραγιάννη – Χρήστου Μ.
Καραϊβάζογλου Π.
Καραμάνης Μ.
Καραμούζης Δ.
Καραμούτης Χ.
Καραντούνας Γ.
Καραρίζος Π.
Κατσούλας Ν.
Κίττας Κ.
Κλάδης Γ.
Κοζής Γ.
Κουλουμπής Π.
Κουμπουλής Φ.
Κουτσομήτρος Σ.
Κυλινδρής Θ.
Κυρίτσης Σ.
Κωτσόπουλος Σ.
Λαμπρινός Γ.
Λέλλης Θ.
Λεμπέσης Γ.
Λόης Δ.
Λουκάς Α.
Λουλούδη Α.
Λουλούδη Β.
Λύκας Χ.
Μαλιδέρου Ε.
Μανωλιάδης Ο.
Μανωλοπούλου Ε.
Μαρτζόπουλος Γ.
Μασλάρης Ν.
Μητρόπουλος Δ.
Μήτσιος Ι.
Μήτσιου Χ.
Μιμίδης Θ.
Μισοπολινός Ν.
Μπαλόπουλος Ε.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ.
Μπαρμπαγιάννης Ν.
Μπαρτζάνας Θ.
Μπερμπερίδης Κ.
Μπιλάλης Δ.
Μπόγδανος Κ.
Μπράμπα Δ.
Μπριασούλης Δ.
Μυστριώτης Α.
Νάματοβ Ε.
Νατιώτη Ε.
Νάτσης Α.
Νικήτα – Μαρτζοπούλου Χ.
Νικολάου Α.
Νούσιος Γ.

Ντιούδης Π.
Ντόντορος Δ.
Παναγάκης Π.
Παναγιωτόπουλος Κ.
Πανούτσου Κ.
Παπαγιαννοπούλου Α.
Παπαδάκης Γ.
Παπαδόπουλος Α.
Παπαδόπουλος Φ.
Παπαθανασίου Ι.
Παπαμιχαήλ Δ.
Παπανίκος Ν.
Παπατόλιος Κ.
Παρισόπουλος Γ.
Πασγιάνος Γ.
Πεχλιβανίδης Γ.
Πιτσιλής Ι.
Ρίζου Ζ.
Ροσμαράκης Σ.
Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ.
Σαραντόπουλος Δ.
Schettini Ε.
Σερσελούδης Χ.
Σιγριμής Ν.
Σιδηράς Ν.
Σκαρπέτης Μ.
Σπυρίδης Α.

Σταθάκος Θ.
Σταματοπούλου Ι.
Σταυρόπουλος Δ.
Στεργιοπούλου Σ.
Talab Τ.
Τάσιου Δ.
Τερζούδη Χ.
Τζανετοπούλου Ι.
Τζιμόπουλος Χ.
Τζώρτζιος Σ.
Τσάμης Π.
Τσάτσα Α.
Τσατσαρέλης Κ.
Τσιρογιάννης Ι.
Τσιώτας Κ.
Τσουλουχά Φ.
Φαρσιρώτου Ε.
Fatnassi Η.
Φείδαρος Δ.
Φλωράς Σ.
Φλώρου Ε.
Φόνσος Μ.
Φουντάς Σ.
Χατζηγιαννάκης Ε.
Χρηστίδου Σ.
Χριστοδούλου Ε.
Ψόχιου Ε.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

«Εμπειρικά και θεωρητικά μοντέλα που προσδιορίζουν τη θραύση χωμάτινων φραγμάτων».....	17
Χ. Τζιμόπουλος, Α. Σπυρίδης	
«Σύγκριση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων με τη βοήθεια εκτιμήσεων πλημμυρικών απορροών».....	26
Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου, Δ. Καραμούζης	
«Εκτίμηση της πιθανότητας επανεμφάνισης των ροών αιχμής ορεινών λεκανών απορροής».....	34
Α. Λουκάς, Α. Βασιλειάδης, Χ. Δομενικιώτης, Ν. Δαλέζιος	
«Αρδευτικές διώρυγες διαφορικής τραχύτητας».....	42
Ι. Δημητρίου	
«Παροχές σχεδιασμού σε σχέση με τη μείωση της δασικής βλάστησης στην Ανατολική Αττική».....	50
Σ. Γιακουμάκης, Σ. Ροσμαράκης, Μ. Φόνσος	
«Αριθμητική προσομοίωση ελεύθερης επιφάνειας σε υδατορρέυματα μεταβαλλόμενης διατομής».....	60
Ε. Φαρσιρώτου	
«Αδιάστατα διαγράμματα υπολογισμού παροχής σε παραβολική διώρυγα με ελεύθερη υδατόπτωση».....	68
Ε. Χατζηγιαννάκης, Ε. Αναστασιάδου – Παρθενίου	
«Επίδραση των αναβαθμών στην κίνηση του νερού της θάλασσας προς το υδατόρευμα».....	77
Γ. Πεγλιβανίδης, Β. Δερμίσης	
«Περιβαλλοντικοί δείκτες για πολυκριτηριακή διαχείριση αρδεύσεων στο αγροτεμάχιο».....	85
Ο. Μανωλιάδης	
«Πειραματικές διαδικασίες διήθησης – στράγγισης σε στρωματοποιημένα εδάφη».....	93
Δ. Καλφούντζος, Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Χ. Τζιμόπουλος	
«Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέα λεκάνης Ολυνθίου».....	101
Θ. Ζήσης, Ν. Καλαϊτζίδου – Πάικου, Δ. Καραμούζης	
«Αλγόριθμος προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης της εδαφικής υγρασίας ακόρεστου πορώδους μέσου με διπλό πορώδες».....	109
Σ. Γιαννόπουλος, Χ. Τζιμόπουλος	
«Εκτίμηση οριακών βρόχων υστέρησης - Αναλυτική και πειραματική προσέγγιση του τριβλήματος».....	117
Χ. Τζιμόπουλος, Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Σ. Στεργιοπούλου	

«Στοχαστική μελέτη του υδατικού ισοζυγίου ενός καλλιεργούμενου εδάφους».....	124
Χ. Γεωργούσης, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος	
«Σύγκριση υπολογισμένων τιμών δυναμικής εξατμισοδιαπνοής καλλιεργειών με τις εξισώσεις Penman και Penman - Monteith»	133
Ι. Αλεξίου, Σ. Κωτσόπουλος, Γ. Ζέρβα, Π. Βύρλας	
«Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης υδραυλικών χαρακτηριστικών σταλάκτη και σταλακτηφόρου σωλήνα»	141
Α. Παπαγιαννοπούλου, Γ. Παρισόπουλος, Δ. Λόης	
«Διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων».....	149
Π. Ντιούδης, Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Ν. Μασλάρης, Γ. Νούσιος	
«Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων».....	157
Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Δ. Καλφούντζος, Ν. Παπανίκος	

ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η ΕΝΕΡΓΕΙΑ

«Ενεργειακές εισροές – εκροές κύριων καλλιεργειών της χώρας μας».....	167
Κ. Τσατσαρέλης	
«Προσομοίωση ξηραντηρίου μηδικής σε σωρό μεγάλου βάθους».....	177
Κ. Ακριτιδής, Α. Δημητριάδης	
«Εξοικονόμηση ενέργειας σε ξηραντήρια με μερική ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας».....	187
Α. Δημητριάδης, Κ. Ακριτιδής, Κ. Αρβανίτης	
«Αξιολόγηση της ανάπτυξης και παραγωγικότητας οκτώ γενότυπων σόργου για παραγωγή βιομάζας και ενέργειας»	197
Α. Νικολάου, Ε. Νάματοβ, Γ. Καβαδάκης, Κ. Τσιώτας, Κ. Πανούτσου, Ν. Δαναλάτος	
«Ανάπτυξη και παραγωγικότητα βιομάζας και σακχάρων καλλιέργειας γλυκού σόργου (cv. Keller) στην Κεντρική Ελλάδα»	205
Γ. Καβαδάκης, Α. Νικολάου, Ε. Αλεξοπούλου, Ε. Νατιώτη, Χ. Μήτσιου, Κ. Πανούτσου, Ν. Δαναλάτος	
«Νέες τεχνικές ελέγχου ασταθών βιολογικών αντιδραστήρων επεξεργασίας βιομάζας: Θεωρία και προσομοίωση»	213
Κ. Αρβανίτης, Ν. Σιγριμής, Γ. Πασγιάνος	
«Επίδραση της θερμοκορτίνας στην ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου»	221
Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Π. Γιαγλάρας, Μ. Καραμάνης, Χ. Λύκας	
«Ενεργειακά ισοζύγια ζαχαρότευτλων με 4 μεθόδους μειωμένης κατεργασίας του εδάφους»	229
Χ. Καβαλάρης, Θ. Γέμτος, Ι. Παπαθανασίου, Χ. Καραμούτης, Χ. Γούλας	

«Εξοικονόμηση ενέργειας κατά τον σχεδιασμό και τη μελέτη μιας ηυκτικής εγκατάστασης».....	237
Δ. Ντόντορος, Γ. Λαμπρινός	

ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

«Μελέτη διάβρωσης των εδαφών της Κεντρικής Ελλάδας»	247
Σ. Θεοχαρόπουλος, Ε. Φλώρου, Φ. Τσουλουχά, Μ. Καραγιάννη - Χρήστου, Π. Κουλουμπής, Σ. Χρηστίδου	
«Εκτίμηση της επίδρασης των καλλιεργητικών τεχνικών βαμβακιού στην διάβρωση του εδάφους»	255
Χ. Τερζούδη, Θ. Γέμος	
«Επίπεδα συγκέντρωσης βορίου σε εδάφη καλλιεργούμενα με καπνό και νερά άρδευσης της Θεσσαλίας».....	263
Ι. Μήτσιος, Ε. Γκόλια, Ζ. Ρίζου	
«Προσδιορισμός της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων σε εδάφη και νερά άρδευσης της περιοχής Θεσσαλίας»	271
Ι. Μήτσιος, Ε. Γκόλια, Ε. Χριστοδούλου	
«Αλάτωση και νατρίωση εδαφών. Προσέγγιση του προβλήματος μελέτης και βελτίωσης με αριθμητικές μεθόδους».....	281
Ν. Μισοπολινός	
«Ποιότητα του εδάφους : Μια νέα οπτική προσέγγισης και διαχείρισης των εδαφικών πόρων»	289
Ν. Μισοπολινός, Γ. Ζαλίδης, Κ. Παναγιωτόπουλος	
«Η επίδραση της μηχανικής διατάραξης στη διασπορά της αργίλου τεσσάρων Alfisols από τη Βόρεια Ελλάδα»	297
Κ. Παπατόλιος, Κ. Παναγιωτόπουλος, Ν. Μπαρμπαγιάννης	
«Εκτίμηση της ποιότητας των νερών άρδευσης και προβλήματα αλατότητας και νατρίωσης σε εδάφη του Ν. Μαγνησίας»	305
Ι. Μήτσιος, Φ. Γάτσιος, Σ. Φλωράς	
«Διαθεσιμότητα εδαφικού φωσφόρου σε αντιπροσωπευτικές χαρτογραφικές μονάδες της Θεσσαλίας».....	312
Ι. Μήτσιος, Ι. Σταματοπούλου, Α. Τσάτσα	

ΕΝΟΤΗΤΑ 4^η ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

«Πειραματική διερεύνηση της σκίασης με δέντρα για έλεγχο της θερμοκρασίας σε κτίρια».....	323
Γ. Παπαδάκης, Π. Τσάμης, Ε. Μαλιδέρου, Σ. Κυρίτσης	

«Δίχτυα εντομοστεγανότητας σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Ανάλυση του συστήματος και ανασκόπηση»	331
Π. Γιαγλάρας, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας	
«Υπολογισμός θερμικής απόδοσης ενός παθητικού και ενός υβριδικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης θερμοκηπίων».....	340
Χ. Νικήτα – Μαρτζοπούλου, Τ. Talab, Γ. Μαρτζόπουλος	
«Επίδραση κρίσιμων παραγόντων στη γήρανση φιλμ πολυαιθυλενίου (LDPE) κατά τη χρήση του ως υλικού κάλυψης θερμοκηπίου»	350
Α. Αριστοπούλου, Δ. Μπριασούλης	
«Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς LDPE φύλλων θερμοκηπίου»	358
Δ. Μπριασούλης, Ε. Schettini	
«Προσομοίωση της ροής του φυσικού αερισμού θερμοκηπίου».....	366
Θ. Μπαρτζάνας, Η. Fatnassi, Δ. Φείδαρος, Ν. Βλάχος, Κ. Κίττας	
«Υλοποίηση σε μικροελεγκτή αλγόριθμου ελέγχου θερμοκρασίας θερμοκηπίου».....	374
Φ. Κουμπουλής, Μ. Σκαρπέτης, Π. Γιαγλάρας, Κ. Κίττας	
«Αριθμητική προσομοίωση της κατανομής ανεμοπιέσεων σε θερμοκηπιακές κατασκευές»	382
Α. Μυστριώτης, Δ. Μπριασούλης	
«Κρίσιμοι συνδυασμοί φορτίσεων για τυπική Ελληνική θερμοκηπιακή κατασκευή, στα πλαίσια του κανονισμού prEN 13031-1:1999. Πρώτη προσέγγιση»	390
Ι. Τσιρογιάννης, Δ. Μπριασούλης	
«Διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα φυτών τριανταφυλλιάς. Μετρήσεις με πορόμετρο».....	398
Σ. Κάβουρας, Ν. Κατσούλας, Κ. Κίττας	
«Η ανεμοφόρτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες»	406
Μ. Θεοχάρης	

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ – ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

«Ο παγκόσμιος ιστός ως εργαλείο ενίσχυσης της εκπαιδευτικής διαδικασίας στη Γεωργική Μηχανική. Εφαρμογή: Διδασκαλία του μαθήματος «Διαχείρισης μικροκλίματος θερμοκηπίου»	417
Μ. Καραμάνης, Κ. Κίττας	
«Εκτίμηση του χρόνου συλλογής με μέτρηση αναπνοής στον αγρό»	425
Δ. Μητρόπουλος, Γ. Κοζής, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Λαμπρινός	
«Αφυδάτωση μήλων ποικιλιών Delicious Pilafa και Granny Smith κατά την απόθιξη».....	433
Δ. Μητρόπουλος, Γ. Λαμπρινός	

«Μεταβολή του χρώματος μήλων Delicious Pilafa και Granny Smith που συντηρούνται σε αποθήκη».....	441
Δ. Μητρόπουλος, Γ. Λαμπρινός	
«Εκτίμηση βάρους νεαρών χοιριδίων με χρήση τεχνικών επεξεργασίας εικόνας»	449
Π. Παναγάκης, Κ. Μπερμπερίδης, Δ. Μπριασούλης, Π. Καραϊβάζογλου, Ε. Δήμας	
«Πολυμεταβλητός έλεγχος υγρασίας και θερμοκρασίας σε καταναμημένο σύστημα γεωργικών μονάδων».....	457
Φ. Κουμπουλή, Μ. Σκαρπέτης, Π. Γιαγλάρας, Κ. Κίττας	

ΕΝΟΤΗΤΑ 6^η ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ

«Όργανα για μέτρηση απορροφώμενης ισχύος από παρελκόμενα ενός ελκυστήρα».....	465
Θ. Γέμτος, Ι. Παπαθανασίου, Θ. Κυλινδρή, Χ. Καραμούτης	
«Επίδραση του βαθμού συμπίεσης του εδάφους της αρχικής υγρασίας και της θερμοκρασίας, στην βλάστηση και την αρχική ανάπτυξη του βαμβακιού»	473
Θ. Λέλλης, Α. Λουλούδη, Β. Λουλούδη	
«Σύγκριση της απόδοσης των μηχανημάτων για κατεργασία εδάφους συμβατική και σε αναχώματα»	481
Θ. Σταθάκος, Θ. Γέμτος	
«Επανασχεδιασμός βαρέως καλλιεργητή με σκοπό τη βελτίωση της αποδιδόμενης εργασίας»	489
Ι. Παπαθανασίου, Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Θ. Γέμτος	
«Πειραματική μελέτη της επίδρασης του προϋνίου και της μάχαιρας αρότρου στην ποιότητα άροσης και στην κατανάλωση ενέργειας»	497
Α. Νάτσης, Γ. Παπαδάκης, Ι. Πιτσιλής	
«Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης ελκτικής ισχύος γεωργικών και δασικών ελκυστήρων»	502
Α. Παπαγιαννοπούλου, Γ. Παρισόπουλος, Δ. Λόης, Χ. Σερσελούδης, Γ. Κλάδης	
«Επίδραση τριών συστημάτων εδαφοκατεργασίας σε εδαφικά και φυτικά χαρακτηριστικά σε καλλιέργεια βαμβακιού»	510
Δ. Μπιλάλης, Ν. Σιδηράς, Π. Ευθυμιάδης	
«Αξιοπιστία μηχανικών μέσων μετατόπισης του ξύλου»	519
Π. Καραρίζος	
«Διαχείριση ζιζανίων σε συστήματα μειωμένης κατεργασίας εδάφους. Εμπειρία από εφαρμογή τους στην Ελλάδα»	527
Μ. Γαλάνης	
«Απόψεις Βρετανών γεωργών για τη συμβολή του Precision Farming στη διαχείριση καλλιεργειών»	535
Σ. Φουντάς	

ΕΝΟΤΗΤΑ 7^η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

«NO ₃ σε νερό και σε λαχανικά. Υπάρχει σχέση; »	545
Σ. Βλειώρας, Δ. Τάσιου, Δ. Βλειώρας	
«Προσεγγίσεις για την εκτίμηση της ρύπανσης των ρεμάτων του Νομού Μαγνησίας από γεωργικές και άλλες δραστηριότητες».....	553
Ι. Μήτσιος, Φ. Γάτσιος, Δ. Σαραντόπουλος	
«Η σημασία των αγρομετεωρολογικών δεικτών στην εξέλιξη της καλλιέργειας του σιταριού στην περιοχή της Λάρισας»	561
Ν. Δαλέζιος, Χ. Δομενικιώτης, Σ. Τζώρζιος, Α. Λουκάς, Ι. Τζαντοπούλου	
«Χωροχρονικές διακυμάνσεις του Βενθικού οικοσυστήματος στον Αμβρακικό κόλπο»	569
Κ. Μπόγδανος, Γ. Λεμπέσης, Ε. Ψόχιου, Δ. Μπράμπα, Α. Θεοδώρου, Ε. Μπαλόπουλος	
«Το πρόβλημα της ρύπανσης των υπόγειων εδαφικών και υδρολιθολογικών σχηματισμών από τη διακίνηση καυσίμων - Ο ρόλος των οριζόντιων γεωτρήσεων»	577
Θ. Μιμίδης, Σ. Κουτσομήτρος, Δ. Σταυρόπουλος	
«Επιφανειακές στρώσεις λυμάτων από εναλλασσόμενα στόμια»	585
Ι. Δημητρίου	
«Μείωση του BOD ₅ αστικών υγρών αποβλήτων με δεξαμενές σταθεροποίησης».....	591
Α. Παπαδόπουλος, Φ. Παπαδόπουλος, Γ. Παρισόπουλος	
«Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εγγειοβελτιωτικών έργων Πηνειού Ηλείας στον προστατευόμενο βιότοπο της λιμνοθάλασσας Κοτυχίου και τα έργα αποκατάστασής του».....	598
Γ. Καραντούνιας, Ν. Δέρκας	
«Μεθοδολογία εκτίμησης του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών από την εφαρμογή φυτοφαρμάκων εδάφους»	606
Β. Αντωνόπουλος	

Αγροτικές Κατασκευές

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΔΕΝΤΡΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Γ. Παπαδάκης*, Π. Τσάμης**, Ε. Μαλιδέρου, Σ. Κυρίτσης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τομέας: Γεωργικών Κατασκευών και Γεωργικής Μηχανολογίας
Ιερά Οδός 75, GR 11855, Αθήνα
E-mail: * gpap@aua.gr, ** egme@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με στόχο να προσδιορίσει την επίδραση της εφαρμογής δέντρων για περιορισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα κτίρια. Διάφορες φυσικές παράμετροι μετρήθηκαν σε δύο περιοχές στον ίδιο τοίχο ενός κτιρίου, η μια περιοχή του οποίου σκιάζονταν από δέντρα ενώ η άλλη όχι. Τα δεδομένα των μετρήσεων μιας ιδιαίτερα θερμής καλοκαιρινής περιόδου συγκρίθηκαν με στόχο να δείξουν τα έντονα φαινόμενα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ κτιρίου και περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δέντρα αποτελούν μια εξαιρετική μέθοδο σκίασης.

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PLANTS SHADING TO SOLAR CONTROL OF BUILDINGS

G. Papadakis*, P. Tsamis**, E. Maliderou, S. Kyritsis

Agricultural University of Athens, Dept. of Agriculture Engineering,
75 Iera Odos street, GR 11855, Athens, Greece
E-mail: * gpap@aua.gr, ** egme@aua.gr

ABSTRACT

An experimental investigation was carried out to analyse the effect of using trees for solar control of buildings by shading. Several physical parameters were measured in two areas on the same façade of a building. Trees shaded one part of the façade while the other one was clear. Comparisons were made for a hot summer period between these two areas so as to determine the heat exchanges with the surrounding environment. Results indicated that plants constitute an excellent passive cooling system plus they offer significant advantages over a normal awning.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμική άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων κατά την διάρκεια του καλοκαιριού είναι σημαντική, ιδιαίτερα σε μεγάλες πόλεις, όπου οι συνήθεις παρατηρούμενες θερμοκρασίες είναι υψηλότερες εξαιτίας των αυξημένων κυκλοφοριακών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων αλλά και της έλλειψης πρασίνου. Την ίδια στιγμή παρατηρείται μια μεγάλη ανάγκη για ικανοποιητικές συνθήκες διαβίωσης ειδικά στους χώρους εργασίας όπου οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Σήμερα υπάρχει η τάση να χρησιμοποιούνται κλιματιστικά συστήματα για να βελτιωθεί η θερμική άνεση στα κτίρια. Γι' αυτό το λόγο η ιδέα να χρησιμοποιηθούν φυτά και δέντρα γύρω από κτίρια και ειδικά στην Νοτιοανατολική πλευρά, με στόχο τον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων από την υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κτίριο και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας, αποκτά τώρα ιδιαίτερο ενδιαφέρον [1],[2]. Τα χρησιμοποιούμενα δέντρα μπορεί να είναι φυλλοβόλα δηλαδή το καλοκαίρι τα φύλλα τους να σκιάζουν το κτίριο, ενώ το χειμώνα - που τα φύλλα έχουν πέσει - επιτρέπουν στις ηλιακές ακτίνες να απορροφηθούν ελεύθερα από το κτίριο. Αυτή η μέθοδος παθητικού δροσισμού οδηγεί σε περιορισμό της χρήσης των κλιματιστικών συστημάτων. Αποτέλεσμα του περιορισμού αυτού είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και ιδιαίτερα η μείωση της κορυφής ζήτησης που παρατηρείται κατά την διάρκεια της ημέρας. Η ημερήσια κορυφή ζήτησης μπορεί να είναι 4 με 5 φορές υψηλότερη από την μέση ημερήσια κατανάλωση, κάνοντας φανερό το πρόβλημα που αυτή δημιουργεί στην ΔΕΗ [3]. Η εφαρμογή φυτών στα κτίρια, εκτός από αισθητικούς σκοπούς, εξυπηρετεί και ενεργειακούς στόχους καθώς επιτυγχάνεται μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Σε αυτή της εργασία έγινε μια μελέτη σχετικά με την επίδραση των δέντρων στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας πλευράς ενός κτιρίου και του περιβάλλοντος. Για αυτό το λόγο εγκαταστάθηκε ένα πείραμα στη ΝΑ πλευρά ενός κτιρίου στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Μια ομάδα οργάνων τοποθετήθηκε σε περιοχή του τοίχου που σκιάζονταν από δέντρα, ενώ μια άλλη ομάδα σε μια περιοχή ελεύθερη από σκιά. Έγινε σύγκριση των διάφορων μετρούμενων παραμέτρων μεταξύ σκιασμένης και μη σκιασμένης περιοχής, σχετικά με τη θερμοκρασία του αέρα, της επιφάνειας, την μεταφορά ενέργειας προς και από τον τοίχο, την ταχύτητα του ανέμου και την σχετική υγρασία του αέρα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για το πείραμα δυο ομάδες οργάνων χρησιμοποιήθηκαν, η μία τοποθετήθηκε στη σκιασμένη περιοχή από φυλλοβόλα δέντρα (*Caesalpinaceae*, *Gleditschia Triacanthus*) - στο εξής θα αναφέρεται και ως περιοχή 1 - και η άλλη ομάδα σε ελεύθερη από σκιάς περιοχή - περιοχή 2. Οι περιοχές 1 και 2 είχαν μέγεθος περίπου 1.5m επί 1.5m σε ένα ύψος 3m από την επιφάνεια του εδάφους και η μεταξύ τους απόσταση ήταν περίπου 7m. Πίσω από τον τοίχο όπου έγινε το πείραμα υπήρχαν γραφεία όπου οι συνθήκες και η θερμοκρασία ήταν παρόμοιες.

Κάθε ομάδα οργάνων αποτελούνταν από τα παρακάτω:

- Ένα πυρανόμετρο, για τη μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, τοποθετημένο κάθετα (κάθετο επίπεδο του τοίχου). Η ένδειξη του οργάνου είναι αποτέλεσμα της άμεσης αλλά και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από το περιβάλλον.

- Ένα ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας για τη μέτρηση του ισοζυγίου ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας τοποθετημένο στο κάθετο επίπεδο του τοίχου.
- Ένα μετρητή θερμικής ροής στην επιφάνεια του τοίχου και μετρά την εισερχόμενη ή εξερχόμενη θερμική ροή.
- Ένα συνδυασμένο όργανο που μετρά την θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα σε απόσταση περίπου 15cm από την επιφάνεια του τοίχου.
- Ένα ανεμόμετρο που μετρά την ταχύτητα του ανέμου σε απόσταση περίπου 20cm από την επιφάνεια του τοίχου.
- Τρία θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (τύπου T) τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του τοίχου και κάτω από το οπτικό πεδίο του ακτινομέτρου. Επίσης ένα ίδιο θερμοζεύγος ήταν τοποθετημένο κάτω από το θερμοροόμετρο.

Επίσης υπήρχε ένα θερμόμετρο τοποθετημένο σε μεγάλη απόσταση από τον χώρο του πειράματος αλλά στο ίδιο κτίριο και μετρούσε την θερμοκρασία του αέρα.

Όλα τα παραπάνω όργανα ήταν συνδεδεμένα με ένα καταγραφικό σύστημα, όπου τα δεδομένα συλλέγονταν και ο μέσος όρος μιας περιόδου 3 λεπτών καταγραφόταν ως η μέση τιμή. Η ένδειξη των τριών θερμοζευγών χρησιμοποιείτο ώστε ο μέσος όρος των τριών να δίνει την μέση θερμοκρασία του τοίχου.

Για να υπολογιστεί το ολικό ποσό ενέργειας που προσπίπτει αλλά και απορροφάται υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα για τις τιμές του ακτινομέτρου αλλά και του θερμορομέτρου. Η τιμή για το καθένα και για την διάρκεια του 24ώρου υπολογίστηκε ως εξής:

$$N_j = \sum_{i=1}^{480} N_{j,i} t \quad F_j = \sum_{i=1}^{480} F_{j,i} t \quad (1)$$

όπου $j=1,2$ (περιοχή 1 και 2), $N_{j,i}$ και $F_{j,i}$ οι μέσες τιμές της καθαρής ακτινοβολίας και της θερμικής ροής αντίστοιχα, που καταγράφονται για το χρονικό διάστημα των 3 λεπτών, $i=1,2,3 \dots 480$ (480 είναι ο αριθμός των 3λεπτων διαστημάτων μιας μέρας) και t το χρονικό διάστημα των 3 λεπτών σε δευτερόλεπτα ($t=180s$).

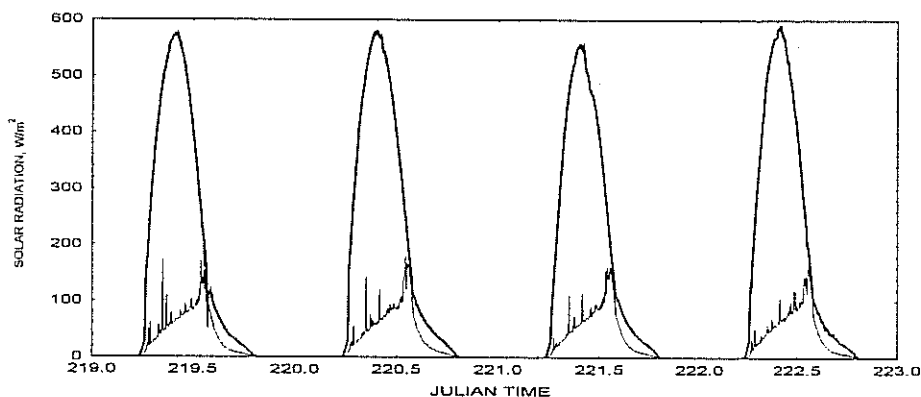
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για να εκτιμηθεί η επίδραση των δέντρων στην ανταλλαγή ενέργειας και θερμότητας μεταξύ κτιρίου και περιβάλλοντος συγκρίθηκαν οι μετρούμενες φυσικές παράμετροι που καταγράφηκαν για σκιασμένη και μη σκιασμένη περιοχή. Μια περίοδος 4 ημερών, η θερμότερη, από 7/8/99 έως 10/8/99 επιλέχθηκε με στόχο να δείξει έντονα φαινόμενα ανταλλαγής ενέργειας.

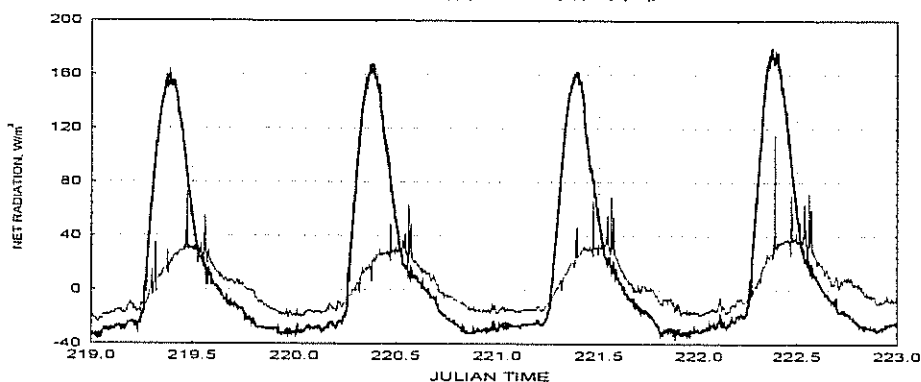
Παρατηρώντας το σχήμα 1 η επίδραση της σκίασης γίνεται αμέσως αντιληπτή. Τα φύλλα των δέντρων εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει μέχρι το επίπεδο του τοίχου. Το πυρανόμετρο στην περιοχή 1 μετρά σχεδόν συνέχεια την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία από το περιβάλλον. Οι κορυφές που παρατηρούνται στο σχήμα για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή 1 οφείλονται σε μικρά κενά (παράθυρα) τα οποία επιτρέπουν στις ηλιακές ακτίνες να πέσουν απ' ευθείας πάνω στο όργανο. Όπως φαίνεται η μέγιστη ένταση ηλιακή ακτινοβολίας για την περιοχή 2 είναι περίπου 600 W/m^2 ενώ για την περιοχή 1 η μέγιστη ένταση παρατηρείται σε κορυφή που με δυσκολία αγγίζει τα 180 W/m^2 .

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η ένταση την καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του τοίχου αντίστοιχα για τις περιοχές 1 και 2. Η ένδειξη του οργάνου μεταφράζεται ως το ισοζύγιο των ακτινοβολιών στην επιφάνεια του τοίχου. Η τιμή της έντασης της

καθαρής ακτινοβολίας για την περιοχή 2 είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της περιοχής 1 για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Στο ίδιο σχήμα επίσης παρατηρείται ότι κατά την διάρκεια της νύχτας η ένταση της καθαρής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη (λιγότερο αρνητική) από αυτήν της περιοχής 2. Το παραπάνω φαινόμενο εξηγείται με την παρουσία των δέντρων τα οποία με τον ίδιο τρόπο που εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια του τοίχου αντίστοιχα εμποδίζουν την επιφάνεια του τοίχου να ακτινοβολήσει ελεύθερα προς το περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο ποσό ενέργειας να εκπέμπεται από τον τοίχο στην περιοχή 1 όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.

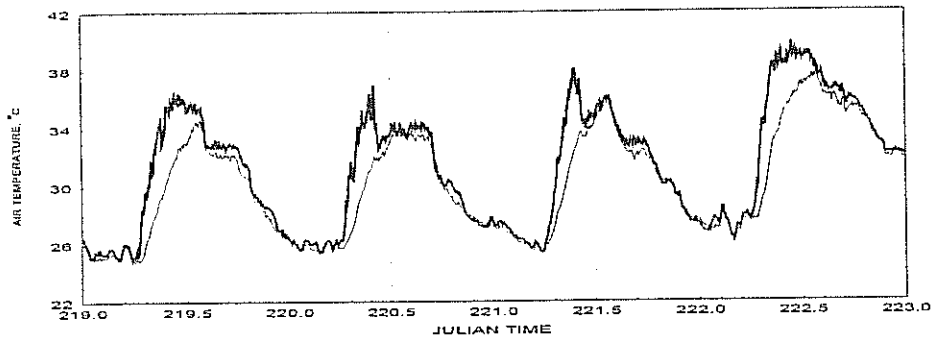


Σχήμα 1. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για την σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

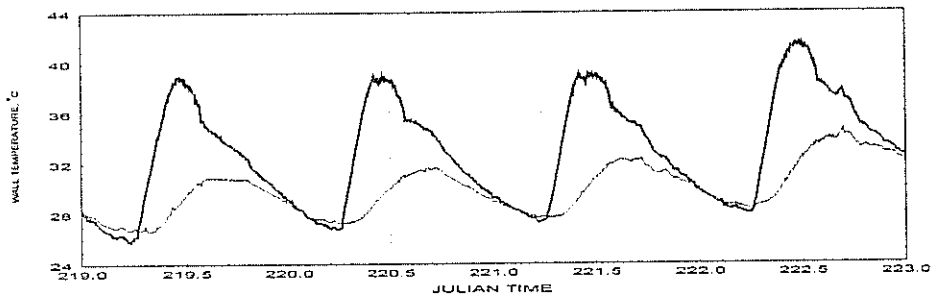


Σχήμα 2. Η ένδειξη του ακτινομέτρου καθαρής ακτινοβολίας για την σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

Κατά την διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία του αέρα στην περιοχή 1 παραμένει σημαντικά χαμηλότερη από τη αντίστοιχη της περιοχής 2 όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Αυτό εξηγείται ως εξής: κατά την διάρκεια της μέρας στην σκιασμένη περιοχή η θερμοκρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη από αυτή του τοίχου (σχήμα 4), αποτέλεσμα αυτού είναι ο αέρας να χάνει θερμότητα με συναγωγή προς τον τοίχο. Το αντίθετο συμβαίνει για την μη σκιασμένη περιοχή όπου ο αέρας θερμαίνεται με συναγωγή από τον θερμότερο τοίχο.

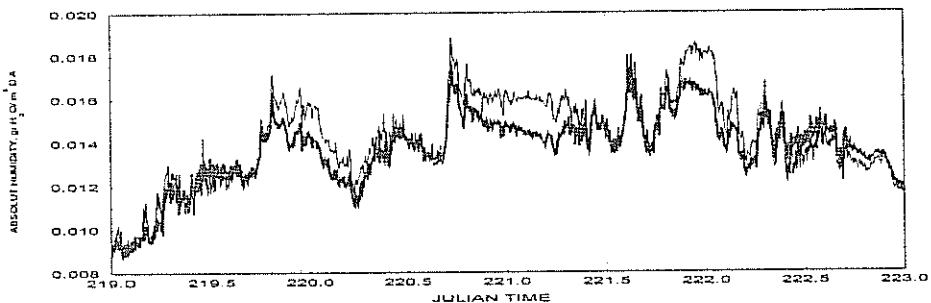


Σχήμα 3. Η θερμοκρασία του αέρα στη σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).



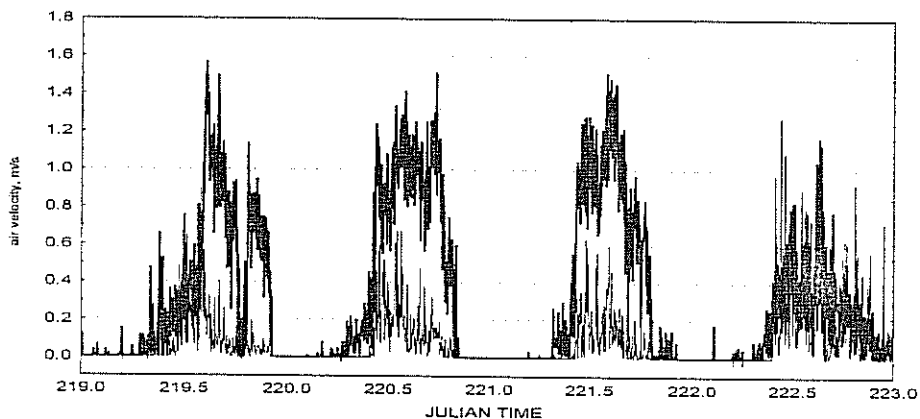
Σχήμα 4. Η θερμοκρασία της επιφάνεια του τοίχου στη σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

Σε συνήθεις κλιματολογικές συνθήκες (χωρίς ακραίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και χωρίς ιδιαίτερα ισχυρό άνεμο) τα φύλλα των δέντρων καταφέρνουν να διατηρούν την θερμοκρασία τους χαμηλότερα από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα με την λειτουργία της διαπνοής [4],[5],[6]. Αν και δεν έγινε απ' ευθείας μέτρηση της θερμοκρασίας των φύλλων των δέντρων του χώρου του πειράματος η αύξηση της υγρασίας τοπικά στην περιοχή 1, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 5, συνηγορεί στην παραπάνω υπόθεση.



Σχήμα 5. Η απόλυτη υγρασία για την σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

Έτσι λοιπόν ο αέρας στην περιοχή 1 χάνει ενέργεια με συναγωγή προς τον τοίχο αλλά και με την επιφάνεια των φύλλων, η θερμοκρασία των οποίων φαίνεται να είναι συγκριτικά μικρότερη. Επιπλέον τα δέντρα εμποδίζουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα με αποτέλεσμα ο κρύος πια αέρας της περιοχής 1 να ανανεώνεται αργά με τον ζεστό αέρα του περιβάλλοντος. Η ένδειξη του ανεμομέτρου όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 6 υποστηρίζει την παραπάνω υπόθεση.



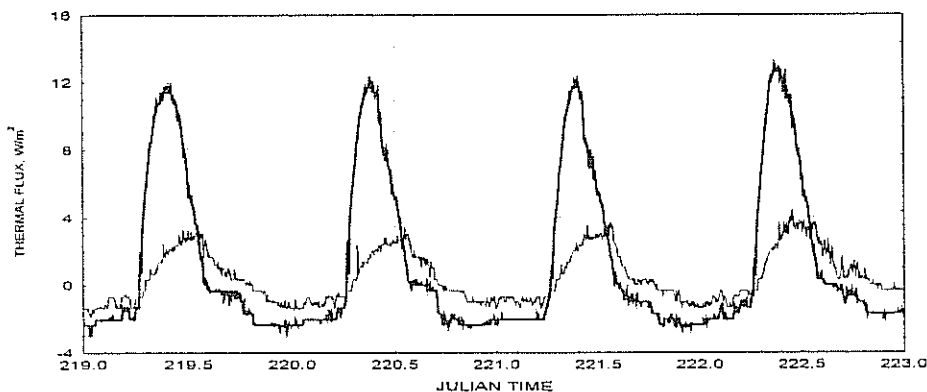
Σχήμα 6. Η ταχύτητα του ανέμου στη σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

Σε περίπτωση που αντί για δέντρα χρησιμοποιηθεί κάποια τέντα για σκίαση ενώ θα περιοριστεί η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που θα προσπίπτει στην επιφάνεια του τοίχου, η θερμοκρασία της τέντας θα αυξηθεί σημαντικά, σε σχέση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα, λόγω απορρόφησης μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η ίδια να ακτινοβολεί. Με αυτόν τον τρόπο ένα επιπλέον θερμικό φορτίο θα ακτινοβολείται προς τον τοίχο ενώ ταυτόχρονα θα θερμαίνεται και ο μεταξύ τους αέρας. Με την χρήση φυτικής κάλυψης το παραπάνω πρόβλημα δεν παρουσιάζεται γιατί τα δέντρα, όπως προαναφέρθηκε διατηρούν την θερμοκρασία των φύλλων τους κάτω από την αντίστοιχη του αέρα.

Κατά την διάρκεια της μέρας η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου στην περιοχή 2, όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4, είναι φανερά υψηλότερη από την αντίστοιχη της περιοχής 1. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στην μεγάλη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του τοίχου στην περιοχή 2. Η θερμοκρασία του τοίχου στην περιοχή 2 είναι αρκετούς βαθμούς υψηλότερη από την αντίστοιχη της περιοχής 1 κατά την διάρκεια της ημέρας ενώ την νύχτα οι δύο τιμές γίνονται περίπου ίδιες. Η μικρότερη παρατηρούμενη θερμοκρασία στην περιοχή 1 είναι ελαφρά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της περιοχής 2 κατά την διάρκεια της νύχτας. Αυτό εξηγείται με το γεγονός ότι τα δέντρα εμποδίζουν την επιφάνεια του τοίχου να ακτινοβολεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να ψύχεται βραδύτερα. Εντούτοις το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την παρούσα μελέτη.

Αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του τοίχου είναι η εμφάνιση θερμικής ροής προς το εσωτερικό του. Η ανάλυση της θερμικής ροής όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 7 οδηγεί σε ανάλογα με τα προηγούμενα συμπεράσματα. Κατά την διάρκεια της μέρας περισσότερη ενέργεια ρέει προς το εσωτερικό του τοίχου, άρα και προς το εσωτερικό του κτιρίου, στην περιοχή 2 από ότι

στην περιοχή 1 εξαιτίας της άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία που έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη θερμοκρασία στην επιφάνεια της περιοχής 2. Η θερμική ενέργεια που απορροφάται από την επιφάνεια του τοίχου μεταδίδεται προς το εσωτερικό του τοίχου και τελικά θα φτάσει στην εσωτερική πλευρά όπου τελικά θα οδηγήσει στην άνοδο της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα.



Σχήμα 7. Η τιμή της θερμικής ροής στον τοίχο για τη σκιασμένη (λεπτή γραμμή) και μη σκιασμένη περιοχή (έντονη γραμμή).

Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η αίσθηση της θερμικής άνεσης σε ένα χώρο είναι το αποτέλεσμα του ισοζυγίου της ακτινοβολούμενης ενέργειας από την επιφάνεια των τοίχων και της θερμοκρασίας του αέρα, είναι φανερό ότι ο χώρος που βρίσκεται πίσω από την σκιασμένη περιοχή θα έχει καλύτερη θερμική άνεση. Επιπλέον όταν ένα κλιματιστικό μηχανήμα χρησιμοποιείται για το δροσισμό του χώρου πίσω από την περιοχή 2 θα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια γιατί ο αέρας θα θερμαίνεται με συναγωγή από τον τοίχο ο οποίος λόγω της μεγάλης θερμικής του αδράνειας θα παραμένει σε υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στον Πίνακα 1 οι τιμές ισοζυγίου καθαρής ενέργειας και θερμικής ροής ανά ημέρα παρουσιάζονται όπως αυτές υπολογίστηκαν με τις Εξισώσεις (1). Φαίνεται στον πίνακα ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια καθώς και η θερμότητα που ρέει στην σκιασμένη περιοχή είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη της μη σκιασμένης. Εντούτοις για το συγκεκριμένο διάστημα των τεσσάρων ημερών αν και η θερμοκρασιακή διαφορά αυξάνει οι λόγοι N_2/N_1 και F_2/F_1 τείνουν να μικρύνουν. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς η θερμοκρασία του αέρα αυξάνει για αυτή την περίοδο των τεσσάρων ημερών η θερμοκρασία του τοίχου αυξάνει επίσης κάνοντας το φαινόμενο της σκίασης λιγότερο αποτελεσματικό για ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας. Επίσης τα δέντρα και γενικά τα φυτά σε ακραίες συνθήκες χάνουν την αποτελεσματικότητά τους να διαπνεύσουν τις απαραίτητες ποσότητες νερού. Έτσι λοιπόν για την περίοδο των τεσσάρων ημερών οι μετρούμενες τιμές για την καθαρή ακτινοβολία και την θερμική ροή στην σκιασμένη περιοχή παρουσιάζουν ρυθμό αύξησης μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες τιμές στην σκιασμένη περιοχή με αποτέλεσμα να μειώνεται ο λόγος N_2/N_1 και F_2/F_1 .

Πίνακας 1. Ημερήσια ακτινοβολούμενα φορτία και θερμικές ροές για σκιασμένη και μη σκιασμένη περιοχή.

Julian Day	N_1 , kJ/m ²	N_2 , kJ/m ²	N_2/N_1	F_1 , kJ/m ²	F_2 , kJ/m ²	F_2/F_1
219 (7/8/99)	107.1	1077.8	10.1	25.2	105.2	4.2
220 (8/8/99)	94.3	1129.7	12.0	26.0	91.9	3.5
221 (9/8/99)	184.3	1008.2	5.5	32.9	88.7	2.7
222 (10/8/99)	601.3	1452.0	2.4	71.7	144.1	2.0

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή φυτών και δέντρων στην σκίαση των κτιρίων μπορεί να είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος παθητικού δροσισμού και ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα ακτινοβολούμενα και θερμικά φορτία που προσπίπτουν στην σκιασμένη από δέντρα περιοχή των κτιρίων αποδεικνύεται ότι είναι σημαντικά μειωμένα έναντι περιοχών όπου δεν υπάρχουν δέντρα. Επιπλέον το φαινόμενο της διαπνοής από τα φύλλα οδηγεί σε μια περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του αέρα που περιβάλλει το κτίριο, που μαζί με την βελτίωση της αισθητικής του χώρου κάνουν την ιδέα της εφαρμογής δέντρων και φυτών για βελτίωση της θερμικής άνεσης των κτιρίων ιδιαίτερα ενδιαφέροντα.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Santamouris M., Asimakopoulos D. (Eds). *Passive Cooling of Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd, 1996, pp 472
2. Granados E., Hupont N., Izard J.L., Marco J., Papadakis G., Ronco L. *Plants: Their application to improve summer thermal comfort in buildings*. Proceedings, International Conference, AgEnergy '99, June 2-5 1999, Athens Greece, Vol. 2, pp 888-895
3. Rozakis S., Soldatos P.G., Papadakis G., Kyritsis S., Papantonis D. *Evaluation of an integrated renewable energy system for electricity generation in rural areas*. Energy Policy, 1997, Vol. 25/3 pp 337-347
4. Monteith J.L., Unsworth M.H. (Eds) *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, 1991, pp 291
5. Papadakis G., Frangoudakis A., Kyritsis S. *Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 57 pp 217-227
6. Parker J. *The effectiveness of vegetation on residential cooling*. Passive Solar Journal, 1983, Vol 2(2).

ΔΙΚΤΥΑ ΕΝΤΟΜΟΣΤΕΓΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Π. Γιαγλάρας, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονίας, Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής
Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος
Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση δικτύων εντομοστεγανότητας εμφανίζει θεαματική εξάπλωση στα θερμοκήπια των μεσογειακών χωρών. Παρόλα αυτά η διερεύνηση της επίδρασής τους στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας είναι αποσπασματική. Σε αυτή την εργασία αναπτύσσεται ένα πλαίσιο για την συστηματική διερεύνηση του οφέλους των δικτύων εντομοστεγανότητας, με κριτήριο την εμπορική αξία της παραγωγής ανά μονάδα χρησιμοποιούμενων χημικών ουσιών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σύγχρονες εξελίξεις με αντικείμενο την επίδραση των δικτύων στο μικροκλίμα των θερμοκηπίων

INSECT-PROOF NETS FOR GREENHOUSE CROPS SYSTEM ANALYSIS AND REVIEW

P. Giaglaras, Th. Bartzanas and C. Kittas

University of Thessaly, School of Agriculture, Crop and Animal Production
Laboratory of Agricultural Constructions and Environmental Control
Pedion Areos, 38334, Volos, Ellada

ABSTRACT

Insect-proof nets are widely used in Mediterranean climates. However research on their effects on crop growth is very scattering. In this paper a framework is presented for the evaluation of the usefulness on insect nets using as criterion the commercial value of the product per unit of chemical pesticides used. Following a review of the current evolutions in the investigation of the effect of insect - proof nets on the greenhouse microclimate.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος των εντόμων με χημικά μέσα στο εσωτερικό των θερμοκηπίων, γίνεται ολοένα και πιο δύσκολος. Το μειωμένο εύρος των εντομοκτόνων, το υψηλό κόστος δημιουργίας νέων καθώς και η ανθεκτικότητα των εντόμων σε αυτά, καθιστά τα χημικά μέσα αναποτελεσματικά για τον έλεγχο των εντομολογικών προσβολών. Ειδικότερα όσον αφορά τα θερμοκήπια, ορισμένα εντομοκτόνα έχουν καταστρεπτική επίδραση στα πλαστικά υλικά κάλυψης [1]. Έτσι την τελευταία δεκαετία, σε συνδυασμό με τον αυξανόμενο προβληματισμό σχετικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος, τις απαιτήσεις για τροφές χωρίς υπολείμματα φυτοφαρμάκων, το θέμα της προστασίας της υγείας των παραγωγών, καθώς με την ανάγκη για μείωση του κόστους παραγωγής, εφαρμόζεται όλο και περισσότερο η «ολοκληρωμένη διαχείριση» των εντόμων (IPM), η οποία περιλαμβάνει τη χρήση παρασιτοειδών, αρπαικτικών, ανθεκτικών στα έντομα φυτών, καλλιεργητικών (κανονική λίπανση, άρδευση, υγιεινή των φυτών) και φυσικών μεθόδων. Τα δίχτυα εντομοστεγανότητας είναι χιτά, πλεκτά ή διάτρητα υλικά κάλυψης τα οποία τοποθετούνται στα ανοίγματα των θερμοκηπίων με σκοπό να παρεμποδίσουν την είσοδο των εντόμων και συγκαταλέγονται μεταξύ των φυσικών (ή μηχανικών) μεθόδων εντομοπροστασίας [2, 3, 4].

Η χρησιμοποίηση δικτύων εντομοστεγανότητας στα ανοίγματα αερισμού των θερμοκηπίων έχει εξαπλωθεί σημαντικά τα τελευταία 5 χρόνια στα θερμοκήπια των Μεσογειακών κυρίως χωρών, όπου τα εντομολογικά προβλήματα είναι πιο έντονα. Παρά την ταχεία εξάπλωσή τους, η τελική επίδρασή τους στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας και στη μείωση της χρήσης χημικών φυτοπροστατευτικών ουσιών δεν έχει αποτελέσει μέχρι σήμερα αντικείμενο ολοκληρωμένης διερεύνησης και τα διαθέσιμα ερευνητικά αποτελέσματα είναι αποσπασματικά.

Σε αυτή την εργασία γίνεται αρχικά μια ανάλυση του συστήματος «Θερμοκήπιο με δίχτυ εντομοστεγανότητας» με στόχο τον εντοπισμό των μηχανισμών που παρεμβαίνουν και εξηγούν την επίδραση των δικτύων εντομοστεγανότητας στην παραγωγικότητα των θερμοκηπίων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των εργασιών που σχετίζονται με τους μηχανισμούς που καθορίζουν την επίδραση των δικτύων στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, δίνοντας έμφαση στην επίδρασή τους στον αερισμό.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η εγκατάσταση δικτύων εντομοστεγανότητας στα ανοίγματα αερισμού των θερμοκηπίων έχει σαν στόχο την μείωση της οικονομικής ζημίας που προκαλούν τα έντομα στα φυτά χωρίς ή με μειωμένη χρήση χημικών ουσιών για περιβαλλοντικούς λόγους. Η αξιολόγηση συνεπώς της καταλληλότητας και της αποτελεσματικότητας ενός δικτύου πρέπει να βασίζεται σε σύγκριση της ποσότητας των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται ανά μονάδα εμπορικής αξίας του παραγόμενου προϊόντος μεταξύ διαφορετικών θερμοκηπίων χωρίς και με δίχτυα διαφόρων τύπων. Είναι προφανές ότι ο αριθμός δυνατών συνδυασμών είναι μεγάλος και αυτό αποκλείει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε λογικά χρονικά πλαίσια με πειράματα. Για το λόγο αυτό θεωρείται σκόπιμη η ανάπτυξη προσομοιωμάτων (μοντέλων) που θα επιτρέπουν την εκτίμηση της παραγόμενης ποσότητας & ποιότητας προϊόντος και της κατανάλωσης χημικών ουσιών λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των δικτύων.

Τα δίχτυα εντομοστεγανότητας επηρεάζουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας με δύο τρόπους:

- τροποποιούν το μικροκλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

- παρεμβαίνουν στην επίδραση των εχθρών και ασθενειών στην ανάπτυξη της καλλιέργειας και στην ποσότητα και ποιότητα του προϊόντος

Η τροποποίηση του κλίματος προέρχεται κυρίως από την επίδραση των δικτύων στον αερισμό και στην περατότητα του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία. Η παρεμβάσεις στην επίδραση των εχθρών και ασθενειών στην ανάπτυξη της καλλιέργειας και στην ποσότητα και ποιότητα του προϊόντος μπορεί να είναι άμεσες και έμμεσες. Η άμεση επίδραση αφορά την μηχανική παρεμπόδιση της εισόδου επιβλαβών οργανισμών στο θερμοκήπιο που επηρεάζει την δυναμική των πληθυσμών τους και κατά συνέπεια την ζημία που προκαλείται στη καλλιέργεια. Οι έμμεσες αφορούν την επίδραση των δικτύων στην είσοδο και στους πληθυσμούς «ωφέλιμων» οργανισμών και στην επίδραση του τροποποιημένου μικροκλίματος τόσο στην δυναμική των πληθυσμών των εχθρών, ασθενειών και ωφέλιμων οργανισμών που βρίσκονται ήδη μέσα στο θερμοκήπιο όσο και στην ευαισθησία της καλλιέργειας στους εχθρούς και ασθένειες.

Με βάση τα παραπάνω, για να είναι δυνατή η ολοκληρωμένη διερεύνηση της επίδρασης των δικτύων εντομοστεγανότητας στη παραγωγικότητα και στη χρήση χημικών ουσιών σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια θα πρέπει να αναπτυχθούν μοντέλα τα οποία να μπορούν να προβλέψουν:

- το μικροκλίμα του θερμοκηπίου από τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας στο εσωτερικό του λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία ή όχι δικτύων,
- την δυναμική των πληθυσμών επιβλαβών και ωφέλιμων οργανισμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συναρτήσει του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, του πληθυσμού στο εξωτερικό περιβάλλον, της δυνατότητας εισόδου-εξόδου από τα ανοίγματα της εφαρμογής χημικών ουσιών και της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους και με την καλλιέργεια
- την ανάπτυξη και παραγωγικότητα της καλλιέργειας σε σχέση με το μικροκλίμα λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση των πληθυσμών επιβλαβών οργανισμών
- την λήψη αποφάσεων για εφαρμογή και τις χρησιμοποιούμενες ποσότητες χημικών ουσιών

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση με αντικείμενο μόνο την πρόβλεψη της επίδρασης των δικτύων στο μικροκλίμα των θερμοκηπίων, λόγω περιορισμένου χώρου.

3. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου χαρακτηρίζεται από τρεις κυρίως μεταβλητές: την ηλιακή (ή/και την φωτοσυνθετικά ενεργή) ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο της καλλιέργειας και από τη θερμοκρασία και υγρασία του αέρα. Η ακτινοβολία μπορεί να εκτιμηθεί από το ισοζύγιο ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, ενώ η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα υπολογίζονται από το ισοζύγιο αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας [5]. Η επίδραση των δικτύων στο μικροκλίμα έχει προσεγγιστεί τόσο με στατιστικά (ή black box) όσο και με επεξηγηματικά, φυσικά, μοντέλα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κυρίως οι επεξηγηματικές προσεγγίσεις του προβλήματος.

3.1. Ισοζύγιο ακτινοβολίας θερμοκηπίου με δίχτυ

Λόγω της επίδρασης της ακτινοβολίας στο ισοζύγιο ενέργειας του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας και στην φωτοσύνθεση και στην διαπνοή της καλλιέργειας, το ισοζύγιο ακτινοβολίας στα θερμοκήπια έχει αποτελέσει αντικείμενο μεγάλου αριθμού ερευνών και μαθηματικών προσομοιωμάτων μέχρι σήμερα [6, 7]. Η ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου χαρακτηρίζεται από το φάσμα της την

έντασή της και την γωνία πρόσπτωσης της στη καλλιέργεια. Τα απλά μαθηματικά προσομοιώματα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία εκτιμούν την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο χρησιμοποιώντας έναν σταθερό συντελεστή περατότητας της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας για όλο θερμοκήπιο και την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία από το λόγο φωτοσυνθετικά ενεργής/προσπίπτουσα ολική ακτινοβολία στο εσωτερικό. Πιο επεξηγηματικά προσομοιώματα του ισοζυγίου ακτινοβολίας, λαμβάνουν υπόψη την κατανομή της φωτεινότητας στον ουρανό, το ποσοστό άμεσης διάχυτης ακτινοβολίας, την γωνία πρόσπτωσης στο υλικό κάλυψης, την φασματική περατότητα, ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα του υλικού και του σκελετού, και υπολογίζουν την φασματική κατανομή και γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στα φυτά [6].

Η εκτίμηση της επίδρασης των διχτύων στην ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου διαφοροποιείται από τις άλλες μελέτες περατότητας των θερμοκηπίων ως προς το ότι τα δίχτυα είναι τοποθετημένα μόνο στα ανοίγματα αερισμού (πλαϊνά και οροφής), είναι διάτρητα και όχι συνεχή όπως τα υλικά κάλυψης και ότι όταν τα παράθυρα είναι κλειστά πρόκειται για περίπτωση διέλευσης από δύο υλικά κάλυψης εκ των οποίων το ένα είναι διάτρητο. Όμως τα οπτικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά και η φυσική συμπεριφορά των διχτύων εντομοστεγανότητας προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό με αυτά των θερμοκορτινών και των διχτύων σκίασης. Την περατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία σε θερμοκήπια με δίχτυα σκίασης (εσωτερικά) προσομοίωσαν πρόσφατα οι Miguel *et al.* [8].

3.2. Ισοζύγιο αισθητής θερμότητας θερμοκηπίου με δίχτυ

Το ισοζύγιο αισθητής θερμότητας εξαρτάται από την προσπίπτουσα και εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, τις ανταλλαγές αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον (διαφυγές και φυσικός ή/και δυναμικός αερισμός), τις ανταλλαγές θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία) μέσω του καλύμματος και τις μεταβολές του ισοζυγίου υδρατμών του αέρα (κυρίως διαπνοή των φυτών και συμπύκνωση υδρατμών) [5]. Με βάση τα παραπάνω προβλέπεται ότι η εγκατάσταση διχτύων εντομοστεγανότητας στα ανοίγματα αερισμού θα επηρεάσει το ισοζύγιο θερμότητας.

- άμεσα, μέσω της επίδρασής τους στη περατότητα της ακτινοβολίας (ηλιακής και θερμικής), για την οποία μιλήσαμε στη προηγούμενη παράγραφο και μέσω της τροποποίησης που επιφέρουν στον αερισμό και στις ανταλλαγές θερμότητας μέσω του καλύμματος.
- και έμμεσα μέσω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο ισοζύγιο λανθάνουσας θερμότητας (κυρίως στη διαπνοή των φυτών).

3.3. Αερισμός θερμοκηπίων με δίχτυ

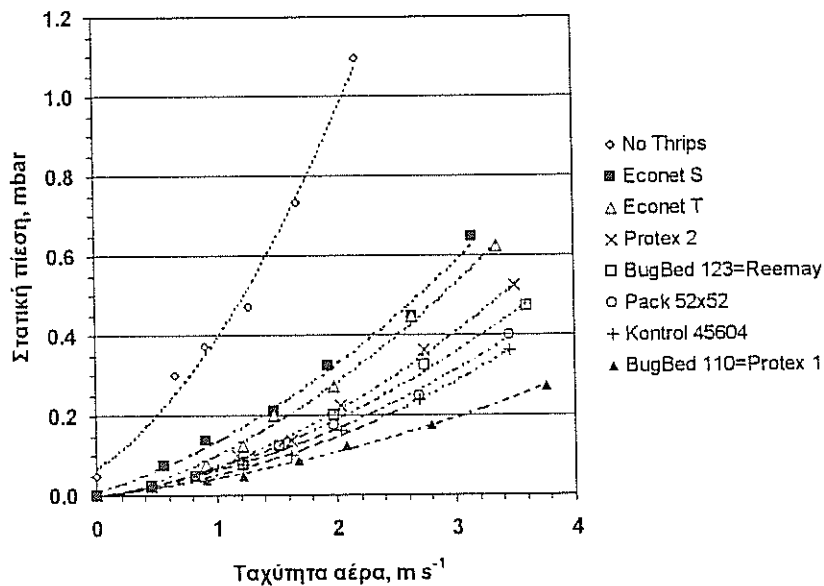
Οι πρώτες εργασίες για τον αερισμό των θερμοκηπίων με δίχτυ εμφανίστηκαν στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας και αφορούν είτε τις αεροδυναμικές ιδιότητες των διχτύων είτε τον δυναμικό υπολογισμό της παροχής αερισμού με φυσικό αερισμό. Οι αεροδυναμικές ιδιότητες των διχτύων καθορίζουν την σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας αέρα και χρησιμοποιούνται άμεσα στην εκτίμηση της επίδρασης των διχτύων στον δυναμικό αερισμό ο οποίος διαφοροποιείται από τον φυσικό ως προς το ότι η παροχή αερισμού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή (ίση με την παροχή των ανεμιστήρων).

3.3.1. Δυναμικός αερισμός

Στη περίπτωση του δυναμικού αερισμού τα δίχτυα δημιουργούν μια πρόσθετη αντίσταση στη ροή του αέρα (στατική πίεση) η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην διαστασιολόγηση των ανεμιστήρων και των ανοιγμάτων αερισμού για την επίτευξη της επιθυμητής παροχής αερισμού.

Για το σκοπό αυτό η Ένωση Κατασκευαστών Θερμοκηπίων των ΗΠΑ (NGMA) [9] έχει εκδώσει πρόσφατα οδηγίες διαστασιολόγησης ανεμιστήρων και ανοιγμάτων αερισμού σε θερμοκήπια με δίχτυ. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να είναι διαθέσιμα στοιχεία για τις σχέσεις παροχής - στατικής πίεσης των ανεμιστήρων και ταχύτητας αέρα - στατικής πίεσης των δικτύων.

Ο υπολογισμός των καμπυλών παροχής - στατικής πίεσης αποτελεί διαδικασία ρουτίνας για τους κατασκευαστές ανεμιστήρων. Όσον αφορά την σχέση ταχύτητας αέρα - στατικής πίεσης των δικτύων η NGMA συνιστά τον υπολογισμό της με βάση το πρότυπο ASHRAE STD. 52.1-1992, από το οποίο υπολογίζεται η πτώση πίεσης του δικτύου με ταχύτητες αέρα από 0 έως 3 m s⁻¹ χωρίς και με αμμοβολή (σκόνη διοξειδίου του πυριτίου 150 - 180 μm).



Σχήμα 1. Σχέση της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας του αέρα.

Οι κατασκευαστές δικτύων εντομοστεγανότητας έχουν ήδη αρχίσει να παρέχουν πληροφορίες για τη πτώση πίεσης των υλικών που εμπορεύονται είτε με τη μορφή καμπυλών πτώσης πίεσης - ταχύτητας αέρα είτε με τη μορφή μιας τιμής πτώσης πίεσης σε ορισμένη ταχύτητα αέρα, συνήθως 1.5 m s⁻¹ (300 ft min⁻¹, ΔP_{1.5}). Ο υπολογισμός της ΔΡ για διαφορετικές τιμές ταχύτητας γίνεται με βάση την εξίσωση ΔΡ = C_{1.5} x u², όπου C_{1.5} (mbar m⁻²sec⁻²) η αντίσταση στη ροή του αέρα με ταχύτητα 1.5 m s⁻¹ (C_{1.5} = ΔΡ_{1.5}/1.5²). Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι σχέσεις ταχύτητας αέρα - πτώσης πίεσης ορισμένων εμπορικών δικτύων που προσδιόρισαν πειραματικά οι Baker *et al.* [10]. Στην πράξη συνιστάται να παρέχεται ένα εύρος ασφαλούς λειτουργίας της τάξης των 124.5 Pa (ή 0.001245 bar ή 0.001229 atm), για την περίπτωση φραγής των δικτύων από

έντομα και σκουπίδια. Για παράδειγμα αν η επιθυμητή παροχή επιτυγχάνεται με στατική πίεση 500 Pa, τότε η υπολογιζόμενη πτώση πίεσης των ανοιγμάτων με το δίχτυ δεν πρέπει να ξεπερνά τα 375.5 Pa.

Η πτώση πίεσης κατά μήκος των δικτύων μπορεί επίσης να υπολογιστεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις σχέσεις της μηχανικής των ρευστών, θεωρώντας τα δίχτυα ως πορώδη υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται αεροδυναμικά από δύο παραμέτρους το πορώδες και τη διαπερατότητα:

- **Πορώδες (porosity):** Ως πορώδες ενός υλικού ορίζεται ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνουν οι οπές προς τον συνολικό όγκο. Επειδή τα δίχτυα είναι φτιαγμένα συνήθως από πολύ λεπτά υλικά το πορώδες υπολογίζεται από τον λόγο της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι οπές προς την συνολική επιφάνεια.

$$\varepsilon = A_v/A \quad (\text{m}^2 \text{ m}^{-2}) \quad (1)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (1) το πορώδες ενός υλικού μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας με την βοήθεια ενός μικροσκοπίου τις επιφάνειες A_v (επιφάνεια οπών) και A (συνολική επιφάνεια) αντίστοιχα.

- **Διαπερατότητα (permeability):** καθορίζει την ικανότητα του υλικού να μεταδίδει το ρευστό (αέρας) διαμέσου του όγκου του. Η διαπερατότητα εξαρτάται από το πορώδες του υλικού, τα χαρακτηριστικά των οπών και είναι ανεξάρτητη από την φύση του ρευστού. Δεν υπάρχουν γενικές σχέσεις οι οποίες να συνδέουν το πορώδες ενός υλικού και την διαπερατότητά του. Οι λίγες υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς με βάση τους οποίους αναπτύχθηκαν.

Οι Miguel *et al.* [11] ανέπτυξαν θεωρητικά και εξακρίβωσαν πειραματικά μια μεθοδολογία εκτίμησης της πτώσης πίεσης των δικτύων συναρτήσει του πορώδους τους η οποία βασίζεται στην εξίσωση του Forchheimer, η οποία είναι της γενικής μορφής:

$$\Delta P = bu^2 + au \quad (2\alpha)$$

$$a = K/\mu \quad (2\beta)$$

$$b = \rho (Y/K^{0.5}) \quad (2\gamma)$$

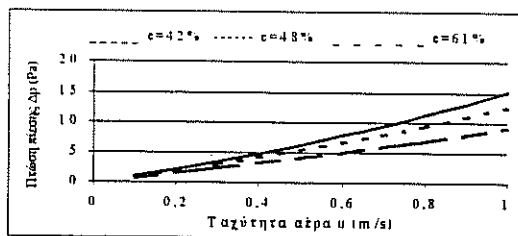
όπου, p η στατική πίεση (Pa), K η διαπερατότητα (permeability, m^2) και μ το δυναμικό ιξώδες ($\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$), ρ η πυκνότητα του ρευστού (αέρας) και Y ένας αδιάστατος συντελεστής.

Μετρώντας σε αεροσήραγγα την πτώση πίεσης διαμέσου της επιφάνειας δικτύων με διαφορετικά πορώδη (ε), υπολόγισε τις ακόλουθες σχέσεις μεταξύ των συντελεστών K , Y και ε :

$$K = 3.44 \text{ e-9 } \varepsilon^{1.6} \quad (3)$$

$$Y = 4.30 \text{ e-2 } \varepsilon^{2.13} \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (2) - (4) είναι δυνατός ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης ενός δικτύου για διαφορετικές ταχύτητες του αέρα συναρτήσει του πορώδους του. Το σχήμα 1 παρουσιάζει την σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας του αέρα για



Σχήμα 2. Σχέση της πτώσης πίεσης με την ταχύτητα του αέρα για υλικά με διαφορετικά πορώδη

δίχτυα με τρία διαφορετικά πορώδη ($\varepsilon = 42\%$, 48% , 61%).

Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά όμως των δικτύων μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου λόγω της φυσικής φθοράς των δικτύων αλλά και λόγω πιθανής κακής χρήσης. Το πορώδες των δικτύων μπορεί να αυξηθεί έως και 2 φορές με

συνέπεια η διαπερατότητά τους (Κ) να αυξάνει από 3 έως 5 φορές.

Με τη μεθοδολογία των Miguel *et al.* [11], η πτώση πίεσης υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια για ταχύτητες αέρα της τάξεως αυτών που συναντώνται στην επιφάνεια των δικτύων σε θερμοκήπια με φυσικό αερισμό.

3.3.2. Φυσικός αερισμός

Η παροχή αέρα διαμέσου ενός ανοίγματος αερισμού των θερμοκηπίου μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση [12]:

$$G = S/2 C_d C_w^{0.5} u \quad (5)$$

όπου S είναι η επιφάνεια των ανοιγμάτων, C_d ο συντελεστής αποφόρτισης, και C_w ο συνολικός συντελεστής επίδρασης του ανέμου. Μεταξύ του C_w και της πτώσης πίεσης ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\Delta P = 0.5 C_w u^2 \quad (6)$$

Οι συντελεστές C_d και C_w μπορούν να υπολογιστούν με τις κλασσικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του φυσικού αερισμού (π.χ. μέτρηση της πτώσης πίεσης, υπολογισμός της παροχής αερισμού με τη μέθοδο αερίου δείκτη) [13].

Η πρόβλεψη της επίδρασης των δικτύων στον φυσικό αερισμό με τη σχέση (5) και τον συντελεστή C_w , απασχόλησε αρκετούς ερευνητές μέχρι σήμερα [14, 15, 16, 17]. Οι Munoz *et al.* [16], υπολόγισαν τις τιμές των συντελεστών C_w και C_d σε θερμοκήπιο με και χωρίς δίχτυ (50 mesh), για διάφορα εύρη ταχυτήτων τόν εξωτερικού αέρα και τύπους ανοιγμάτων (aspect ratio) και κατέληξαν στις ακόλουθες δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού χωρίς και με δίχτυ, αντίστοιχα:

$$\text{χωρίς δίχτυ} \quad G = 3.44u + 3.79 \quad (7a)$$

$$\text{με δίχτυ} \quad G = 1.64u - 0.77 \quad (7b)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται ότι στην περίπτωση για παράδειγμα που η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα είναι $u=3 \text{ m s}^{-1}$ η παροχή αερισμού για το θερμοκήπιο χωρίς δίχτυ θα είναι $14.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ενώ για θερμοκήπιο με δίχτυ θα είναι $4.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν και οι Montero *et al.* [17] οι οποίοι προσδιόρισαν τον συντελεστή αποφόρτισης με διάφορους τύπους δικτύων τοποθετημένων σε συνεχόμενα ανοίγματα αερισμού. Διαπίστωσαν μείωση των εναλλαγών αέρα έως και 50% σε σχέση με θερμοκήπιο χωρίς δίχτυ.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Από την ανάλυση του συστήματος προέκυψε ένα πλαίσιο για τη συστηματική διερεύνηση και αξιολόγηση του οφέλους από την εγκατάσταση δικτύων εντομοστεγανότητας στα θερμοκήπια χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο την εμπορική αξία της παραγωγής ανά μονάδα χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται.

Για το σκοπό αυτό απαιτούνται βιοφυσικά μοντέλα που να προβλέπουν την δυναμική του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, των επιβλαβών και ωφέλιμων οργανισμών, και της καλλιέργειας που να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των δικτύων στο μικροκλίμα και στους οργανισμούς καθώς και των επιβλαβών οργανισμών στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας.

Η ανασκόπηση τέλος των μεθόδων πρόβλεψης της επίδρασης των δικτύων στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου έδειξε ότι από το 1990 που ξεκίνησε η διερεύνηση του προβλήματος μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές εξελίξεις όσον αφορά την πρόβλεψη της επίδρασης των δικτύων τόσο στον δυναμικό όσο και στον φυσικό αερισμό ενώ η επίδρασή τους στο ισοζύγιο ακτινοβολίας δεν έχει ακόμα διερευνηθεί παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ήδη αρκετά μοντέλα τα οποία θα μπορούσαν να εφαρμοστούν άμεσα. Το ίδιο ισχύει και για την επίδραση των δικτύων στις ανταλλαγές

θερμότητας από το κάλυμμα, με συναγωγή, αγωγή και θερμική ακτινοβολία. Η προτίμηση προς τη διερεύνηση της επίδρασης στο αερισμό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δίχτυα εντομοστεγανότητας χρησιμοποιούνται κυρίως από άνοιξη έως αρχές Σεπτεμβρίου, σε Μεσογειακές περιοχές, όπου υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης των θερμοκηπίων λόγω μειωμένου αερισμού.

Εξελίξεις αναμένονται στη πρόβλεψη της κατανομής των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με τη χρήση σύγχρονων εργαλείων ρευστομηχανικής (C.F.D.), οι οποίες θα επιτρέψουν την διερεύνηση των συνθηκών που δημιουργούνται στο μικροπεριβάλλον των φυτών και των φύλλων καθώς και τον εντοπισμό των σημείων εκείνων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου όπου πιθανόν να δημιουργούνται συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη επιβλαβών οργανισμών, λόγω της μείωσης της ταχύτητας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου που προκαλούν τα δίχτυα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Desriac, Ph., 1991. The effect of pesticides on the life of greenhouse films. *Plasticulture* 1: 9-16
2. Berlinger, M.J., Lebiush-Mordechai, S. and Leeper, A., 1991. Application of screens to prevent whitefly penetration into greenhouses in the Mediterranean basin. *Bull. IOBC/WPRS*, XIV/5:105-110.
3. Berlinger, M.J. and Lebiush-Mordechai, S., 1995. Bemisia 1995. Taxonomy, Biology, Damage control and management, Edited by Gerlin D., Intercept Ltd. Andover, Hants. UK, 617-634.
4. Teitel, M., Barak, M., Berlinger, M.J. and Lebiush-Mordechai, S., 1999. Insect proof screens: their effect on roof ventilation and insect penetration. *Acta Horticulturae* 507:29-37.
5. Παπαδάκης, Γ., 1989. Πειραματική ανάλυση και δυναμική προσομοίωση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο. Διδακτορική διατριβή, Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 166 σελίδες.
6. Baille, A. and Tchamitchian, M., 1992. Solar Radiation in greenhouses. In: *Crop Structure and Light Microclimate. Characterisation and applications*. Varlet-Grancher, C., R. Bonhomme, H. Sinoquet (eds), Science Update, INRA Editions.
7. Critten, D.L., 1993. A review of the light transmissivity into glasshouse crops. *Acta Hortic.*, 328: 9 - 31.
8. Miguel, A.F., Silva, A.M. and Rosa, R., 1994. Solar radiation inside a single span greenhouse with shading screens. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59: 61-79.
9. NGMA, 1997. National Greenhouse Manufacturers Association. Greenhouse construction recommendations.
10. Baker, J.R. and Shearin, E.A., 1994. An update on screening for the exclusion of insect pests. *N.C Flower Growers Bulletin* 39(2):6-11.
11. Miguel, A.F., van de Braak, N.J. and Bot, G.P.A., 1997. Analysis of the airflow Characteristics of greenhouse screening materials. *J.Agric. Engng Res.* 67:105-112.

12. Kittas, C., Boulard, T. and Papadakis, G., 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40 (2) :415-425.
13. Kittas, C., Boulard, T., Mermier, M. and Papadakis, G., 1996. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65:37-49.
14. Sase, S. and Christianson, L.L., 1990. Screening greenhouse – some engineering considerations. ASAE Paper No. NABEC:90-201.
15. Kosmos, S.R., Riskowski, G.L. and Christianson, L.L., 1993. Force and static pressure resulting from airflow through screens. *Transactions of the ASAE*, 36:1467-1472.
16. Munoz, P., Montero, J.I., Anton, A. and Giuffrida, F., 1999. Effect of insect –proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. *J.Agric. Engng Res.*73: 171-178.
17. Montero, J I., Munoz, P. and Anton, A., 1996. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens, *Acta Horticulturae* 443:71-77.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Χ. Νικήτα - Μαρτζοπούλου, Τ. Talab, Γ. Μαρτζόπουλος
Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα υβριδικό ηλιακό σύστημα, που αποτελείται από σωλήνες πολυαιθυλενίου με νερό που θερμαίνεται επιπρόσθετα με μια απλή εγκατάσταση συλλογής και διανομής του ζεστού αέρα του θερμοκηπίου, συγκρίνεται με ένα παθητικό ηλιακό σύστημα που αποτελείται μόνο από σωλήνες πολυαιθυλενίου με νερό. Η πειραματική εγκατάσταση έγινε σε δύο πανομοιότυπα θερμοκήπια με υλικό κάλυψης πολυαιθυλένιο στο Μ.Α.Ι.Χ. στην Κρήτη. Για τον υπολογισμό των αποδόσεων έγιναν μετρήσεις της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, των θερμοκρασιών του νερού των σωλήνων (συλλεκτών) και του περιβάλλοντος στα δύο θερμοκήπια. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η θερμική απόδοση του υβριδικού συστήματος ήταν κατά 20% υψηλότερη από την αντίστοιχη του παθητικού.

ESTIMATION OF HEAT PRODUCTION OF A PASSIVE AND A HYBRID SOLAR HEATING SYSTEM OF GREENHOUSES

C.Nikita - Martzopoulou, T. Talab, G. Martzopoulos
Department of Agricultural Engineering, School of Agriculture,
Aristotle University of Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

A hybrid solar system consisted of water - filled polyethylene sleeves which are additionally heated by a simple installation for collection and distribution of the warm air inside the greenhouse is compared with a common passive solar system consisted only of water - filled polyethylene sleeves. The experiment was carried out in two similar greenhouses with polyethylene cover installed in M.A.I.C.H. - Crete.

To estimate the efficiency of the two systems, the incident solar energy, the temperatures of the water-sleeves (collectors) and of the greenhouses environment were measured. By the comparison of the results it came out that the heat efficiency of the hybrid solar system was 20% higher than this of the passive one.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θερμοκήπιο είναι ένας μεγάλος παθητικός ηλιακός συλλέκτης. Είναι βέβαια γνωστό ότι οι θερμικές απώλειες της θερμοκηπιακής κατασκευής κατά τη διάρκεια της νύχτας αλλά και της ημέρας, όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία αέρα και εδάφους μέσα στο θερμοκήπιο να είναι χαμηλότερες των optimum θερμοκρασιών για τις καλλιέργειες.

Έτσι προκύπτει η ανάγκη χρήσης συμπληρωματικής τεχνητής θέρμανσης. Όταν γίνεται χρήση της ηλιακής ενέργειας αντί συμβατικών καυσίμων χρησιμοποιούνται συστήματα παθητικά, ενεργητικά ή υβριδικά.

Στην έρευνα αυτή αξιολογείται ένα νέο υβριδικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης θερμοκηπίων σε σχέση με ένα βελτιωμένο παθητικό ηλιακό σύστημα. Τα δύο συστήματα βασίζονται στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας σε νερό που αποθηκεύεται μέσα σε σωλήνες πολυαιθυλενίου (συλλέκτης). Στο υβριδικό σύστημα υπάρχει επιπλέον μια εγκατάσταση για την ανάκτηση της πλεονάζουσας θερμότητας του θερμοκηπίου.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο υπολογισμός της θερμικής απόδοσης των δύο συστημάτων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η απώλεια θερμότητας από τους σωλήνες πολυαιθυλενίου με νερό στο περιβάλλον γίνεται με μεταφορά, ακτινοβολία και αγωγή και υπολογίζεται από την εξίσωση (1) :

$$q_{\text{loss}} = q_{\text{cv}} + q_r + q_{\text{cd}} \quad (1)$$

όπου

q_{loss} : συνολική απώλεια, W/m^2

q_{cv} : απώλεια με μεταφορά στον αέρα, W/m^2

q_r : απώλεια με ακτινοβολία W/m^2

q_{cd} : απώλεια με αγωγή στο έδαφος, W/m^2

Η απώλεια με μεταφορά q_{cv} υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Newton ως εξής:

$$q_{\text{cv}} = h_{\text{cv}} \frac{A_{\text{fs}}}{A_{\text{GIS}}} (T_w - T_a) \quad (2)$$

όπου

h_{cv} : συντελεστής θερμικής μεταφοράς, $W/m^2 \cdot ^\circ K$

A_{fs} : ελεύθερη επιφάνεια του ηλιακού συστήματος, m^2

A_{GIS} : επιφάνεια εδάφους που καλύπτεται από το σύστημα, m^2

T_w : θερμοκρασία νερού, $^\circ K$

T_a : θερμοκρασία αέρα, $^\circ K$

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς h_{cv} , για μεταφορά με στρωτή ροή σε οριζόντιους κυλίνδρους με διάμετρο d_{cv} μπορεί να προσδιορισθεί από την παρακάτω εξίσωση [3]:

$$h_{cv} = 5 \left(\frac{T_w - T_a}{(T_a - 273) d_{cv}} \right)^{0.25} \quad (3)$$

Εάν η ροή είναι στροβιλώδης δεν εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα και στην περίπτωση αυτή ο h_{cv} υπολογίζεται ως εξής [8]:

$$h_{cv} = C_T (T_w - T_a)^{0.333} \quad (4)$$

όπου ο συντελεστής C_T εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του κυλίνδρου και του περιβάλλοντος χώρου. Μία μέση τιμή ίση με 1.96 για συνθήκες θερμοκηπίου γίνεται γενικά αποδεκτή [6].

Σύμφωνα με άλλες έρευνες [4], [7] ο h_{cv} , σε περίπτωση θερμικής απώλειας από το συλλέκτη (θερμοκρασία αέρα χαμηλότερη του νερού) μπορεί να υπολογισθεί με την εξίσωση :

$$h_{cv} = 1.24 ((T_w - T_a) / d_{cv})^{0.333} \quad (5)$$

Η απώλεια θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να προσδιορισθεί από την παρακάτω εξίσωση [5], όπου λαμβάνονται υπόψη η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ του συλλέκτη και του περιβάλλοντος χώρου :

$$q_r = (A_{ss} / A_{GS}) C_s 10^{-8} (T_w^4 - T_{SR}^4) \quad (6)$$

όπου

C_s : συντελεστής ανταλλαγής ακτινοβολίας, $W/m^2 \cdot ^\circ K^4$

T_{SR} : θερμοκρασία επιφάνειας, περιβάλλοντος χώρου $^\circ K$.

Για συνθήκες θερμοκηπίου με υλικό κάλυψης πλαστικό οι τιμές C_s έχουν βρεθεί να κυμαίνονται από $5.0 - 5.5 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot ^\circ K^4$ [5].

Η απώλεια θερμότητας με αγωγή στο έδαφος υπολογίσθηκε για βάθος εδάφους 0.30 m διότι σ' αυτό το βάθος η θερμοκρασία είναι περίπου ίση με τη μέση ημερήσια [1]. Η θερμοκρασία εδάφους ήταν χαμηλότερη από αυτήν του νερού από το μεσημέρι μέχρι τα μεσάνυχτα ή μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες. Το διάστημα αυτό η απώλεια με αγωγή στο έδαφος βρέθηκε να είναι πολύ μικρή και συγκεκριμένα μόλις 2%. σε σχέση με τις απώλειες λόγω μεταφοράς στον αέρα και λόγω ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει διότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ νερού και εδάφους είναι μικρή. Η απώλεια θερμότητας με αγωγή δεν υπολογίσθηκε στη συνολική απώλεια θερμότητας λόγω του μικρού ποσοστού συμμετοχής της.

Η ενέργεια που συλλέγεται (E_c) και αυτή που αποδίδεται (E_r) από το νερό των σωλήνων πολυαιθυλενίου υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_c = M_w (T_{w \min 1} - T_{w \max}) C_p \quad (7)$$

$$E_r = M_w (T_{w \max} - T_{w \min 2}) C_p \quad (8)$$

όπου

E_c = ενέργεια που συλλέγεται. MJ

E_r = ενέργεια που απελευθερώνεται. MJ

M_w = μάζα νερού, kg

C_p = ειδική θερμότητα νερού, $4.186 \cdot 10^{-1} MJ/kg \cdot ^\circ C$

$T_{w \min 1}$ = ελάχιστη θερμοκρασία νερού στις 7 :00

$T_{w \max}$ = μέγιστη θερμοκρασία νερού κατά τη δύση του ήλιου

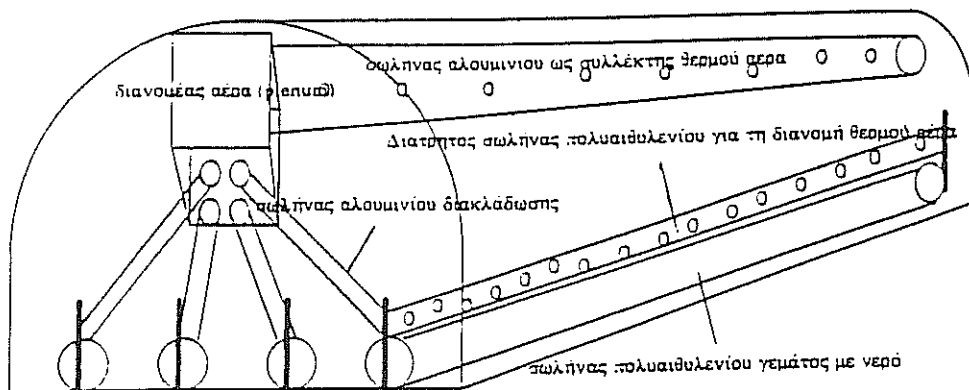
$T_{w \min 2}$ = ελάχιστη θερμοκρασία νερού την επόμενη στις 7 :00

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπα θερμοκήπια τύπου τροποποιημένου τοξωτού, με καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού. Οι διαστάσεις των θερμοκηπίων ήταν 20.00 m x 7.7 m με υλικό κάλυψης πολυαιθυλένιο. Στη μία από τις κατασκευές (μάρτυρας) εγκαταστάθηκε ένα παθητικό ηλιακό σύστημα και στην άλλη ένα υβριδικό.

Το παθητικό σύστημα περιελάμβανε διαφανείς σωλήνες πολυαιθυλενίου τοποθετημένους σε τέσσερις γραμμές στο έδαφος κατά μήκος της κατασκευής και μεταξύ των γραμμών της καλλιέργειας. Η περίμετρος των σωλήνων ήταν 1.50 m, το μήκος τους 18.00 m και το πάχος του τοιχώματος 15×10^{-5} m. Κάτω από κάθε σωλήνα τοποθετήθηκε ένα μαύρο πλαστικό φύλλο πλάτους 0.80 m και πάχους 8×10^{-5} m. Κάθε σωλήνας είχε 30001 νερού ύδρευσης ώστε ο συνολικός όγκος νερού να είναι 120001 (77.9 l/m^2) ανά θερμοκήπιο. Ένα μυκητοκτόνο σκεύασμα χαλκού προστέθηκε στο νερό σε αναλογία 43.3 mg/l νερού για την αποφυγή ανάπτυξης αλγών.

Στο θερμοκήπιο με το υβριδικό ηλιακό σύστημα τοποθετήθηκαν παρόμοιοι σωλήνες γεμάτοι με νερό όπως και στο θερμοκήπιο "μάρτυρας". Για να αυξηθεί η απόδοση του παθητικού συστήματος έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί η επιπλέον θερμότητα, που διαφεύγει λόγω αερισμού, για τη θέρμανση των σωλήνων με νερό, όταν αυτοί είναι υπό σκιά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη διανομή του εγκλωβισμένου κάτω από την οροφή του θερμοκηπίου θερμού αέρα, στην περιοχή των σωλήνων με νερό. Για το σκοπό αυτό ένας φυγοκεντρικός ανεμιστήρας, CBM 270/270 του οίκου SOLER & PALAV (Ισπανίας) με μηχανική ισχύ 1/2 hp, και παροχή $4500 \text{ m}^3/\text{h}$, τοποθετήθηκε στην είσοδο ενός μεταλλικού διανομέα αέρα (plenum), διαστάσεων 0.60 m x 0.49 m x 0.48 m που είχε τέσσερις εξόδους διαμέτρου 0.195 m [Σχ. 1].



Σχήμα 1. Το υβριδικό σύστημα για τη συλλογή και διανομή του θερμού αέρα.

Ένας σπειροειδής σωλήνας αλουμινίου διαμέτρου 0.406 m και συνολικού μήκους 18.00 m, τοποθετήθηκε κάτω από την τροφοί ως κύριος αγωγός συλλογής θερμού αέρα. Η ανώτερη επιφάνεια του σωλήνα αλουμινίου χρωματίστηκε με μαύρο ματ χρώμα ώστε να ελαχιστοποιείται η ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και έτσι να αυξάνεται η

απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Ο σωλήνας αλουμινίου ήταν συνδεδεμένος με την πλευρά της εισόδου στον διανομέα αέρα. Ο διανομέας αέρα είχε τέσσερις εξόδους με ρυθμιζόμενες βαλβίδες για τον έλεγχο διανομής του αέρα. Στην πραγματικότητα βρέθηκε ότι δεν ήταν απαραίτητος ο έλεγχος της ροής του αέρα. Οι σπειροειδείς σωλήνες αλουμινίου, διαμέτρου 0.20 m, ήταν συνδεδεμένοι με τις εξόδους του διανομέα και διοχέτευαν το θερμό αέρα στο επίπεδο των σωλήνων δια μέσου διάτρητων διαφανών αγωγών πολυαιθυλενίου (διαμέτρου 0.191 m) τοποθετημένων πάνω από τους σωλήνες με νερό, που χρησιμοποιούν για θερμοσυσσώρευση (Σχ. 1).

Ο έλεγχος λειτουργίας του ανεμιστήρα γινόταν με τη βοήθεια ενός θερμοστάτη τοποθετημένου στο κέντρο της οροφής, 0.05 m από τον αγωγό αλουμινίου. Όταν η θερμοκρασία αέρα κοντά στο θερμοστάτη έφθανε στους 23° C, ο ανεμιστήρας ενεργοποιείτο αυτόματα, εξάγοντας αέρα από το πάνω μέρος της κατασκευής και διανέμοντας τον δια μέσου των οπών των αγωγών πολυαιθυλενίου πάνω από τους σωλήνες θερμοσυσσώρευσης. Με βελτίωση των κλιματικών συνθηκών, η θερμοκρασία του νερού έφθασε στους 20° C και έτσι το σημείο ρύθμισης του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυξήθηκε μέχρι τους 27.5° C.

Ο ανεμιστήρας δεν λειτουργούσε ποτέ τη νύχτα λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας αέρα από τη ρυθμισμένη του θερμοστάτη.

Όταν η θερμοκρασία του αέρα ήταν πάνω από 29° C τα πλευρικά παράθυρα άνοιγαν για να επιτρέπουν φυσικό αερισμό. Φυσικός αερισμός επιτρεπόταν σε μικρές περιόδους για τη μείωση της σχετικής υγρασίας και την αύξηση του CO₂ μέσα στο θερμοκήπιο ακόμα και όταν η θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 23° C.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα αυτό ήταν τα ακόλουθα:

- Υδραργυρικά θερμοόμετρα ελαχίστου - μεγίστου (θερμοκρασία του αέρα),
- Υδραργυρικά θερμοόμετρα επαφής (θερμοκρασία του νερού),
- Ηλιόμετρο Quantum Delta T, QS-10040,
- Ένα PLC τύπου PS 74-U, 75 καναλιών που ήταν συνδεδεμένο με :
 - α - αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου PT 100,
 - β - πυρανόμετρο τύπου Campbell, SP 1100,
 - γ - υγρασιόμετρο τύπου Johnson, W 99.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν μετρήσεις των θερμοκρασιών νερού, αέρα, εδάφους και ηλιακής ακτινοβολίας.

Η θερμοκρασία του νερού είχε διακυμάνσεις στα δύο συστήματα και ήταν εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια εξαερισμού, η μέση θερμοκρασία του νερού στο υβριδικό σύστημα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με το παθητικό σύστημα. Η μέγιστη θερμοκρασία του νερού στο υβριδικό ήταν μεγαλύτερη με στατιστικώς σημαντική διαφορά σε επίπεδο P = 5% απ' ότι στο παθητικό, ενώ δεν βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων στην ελάχιστη θερμοκρασία νερού (Σχ. 2, 3).

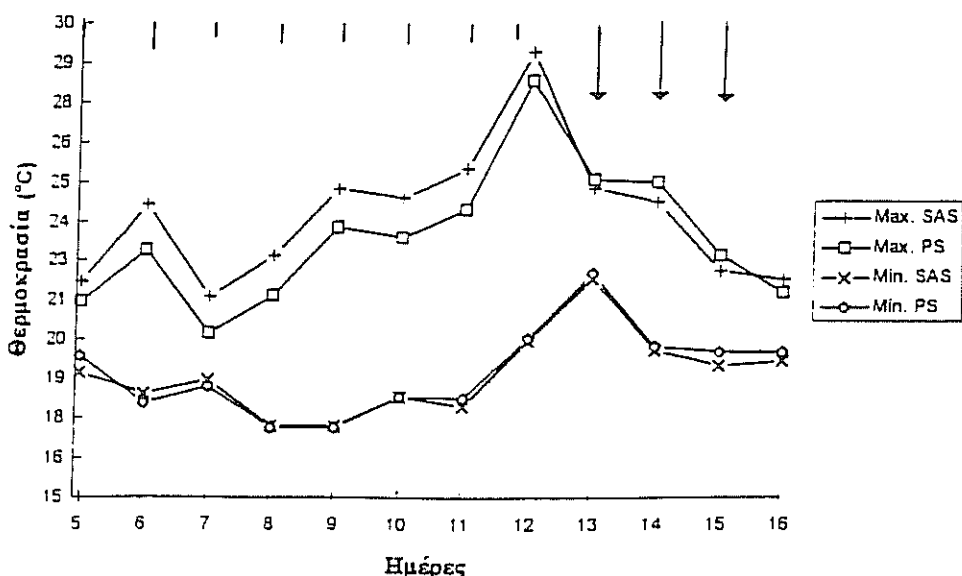
Γενικά το υβριδικό σύστημα παρουσίασε υψηλότερη συλλογή και κατά συνέπεια απελευθέρωση ενέργειας απ' ότι το παθητικό, η οποία κατά μέσο όρο ανήλθε στο 20%, το μήνα Απρίλιο, όταν λειτουργούσε ο ανεμιστήρας (Σχ. 4).

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι θερμοκρασίες νερού και η ενέργεια που συλλέγεται και απελευθερώνεται από τα δύο συστήματα.

Πίνακας 1. Θερμοκρασίες νερού (T_w) και ενέργεια που συλλέγεται (E_c) και (E_r) απελευθερώνεται από τα δύο συστήματα στις 7, 8 Απριλίου.

	SAS w1	SAS w2	SAS w3	SAS w4	PS w1	PS w2	PS w3	PS w4
T_w min1	18.5	18.8	19.5	18	18.2	18	19.2	18.5
T_w max	21.5	21.5	21.5	21	20	20.2	20.5	20
T_w min2	17.2	17.2	18	16.5	17	16.5	18	17.2
E_c	37.67	33.91	25.12	37.67	22.60	27.63	16.33	18.84
E_r	54.00	54.00	43.95	56.51	37.67	46.46	31.40	35.16

*SAS: υβριδικό ηλιακό σύστημα PS: παθητικό ηλιακό σύστημα



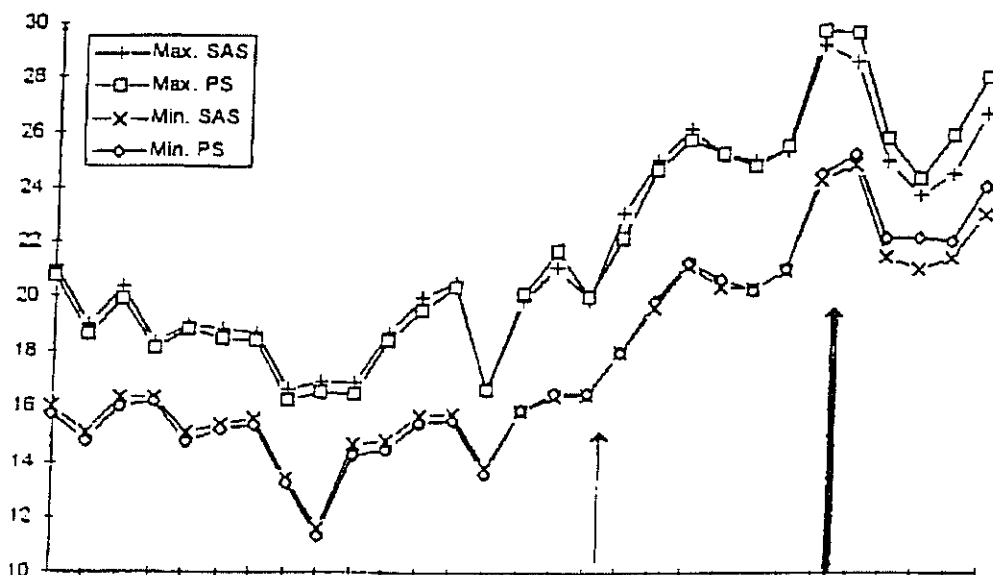
Σχήμα 2. Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες νερού στο υβριδικό και στο παθητικό σύστημα (Απρίλιος 1994).

Οι ράβδοι στο επάνω μέρος του σχήματος είναι οι ελάχιστες σημαντικές διαφορές σε επίπεδο 5%, ενώ τα βέλη δείχνουν τις ημέρες που ο ανεμιστήρας δεν λειτουργούσε ή λειτουργούσε μόνο για λίγα λεπτά.

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου από Φεβρουάριο μέχρι Απρίλιο έγιναν 278 μετρήσεις τις ώρες που οι σωλήνες πολυαιθυλενίου απέδιδαν θερμότητα στο περιβάλλον. Αυτό συνέβαινε περίπου από τις 20:00 απογευματινή ώρα μέχρι τις 7:00 πρωινή ώρα της επομένης, όταν η θερμοκρασία του νερού στους σωλήνες ήταν υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα.

Για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (6). Για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας με μεταφορά η εξίσωση (2), ενώ για τον συντελεστή θερμικής μεταφοράς οι εξισώσεις (3), (4) και (5). Τα πειραματικά

δεδομένα βρήκαν καλή εφαρμογή στις εξισώσεις (3) και (5) αλλά η εξίσωση (5) ήταν πιο κοντά στην πραγματική απώλεια θερμότητας. Από την εφαρμογή αυτής της εξίσωσης ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς βρέθηκε να κυμαίνεται από $2.74 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ στο υβριδικό σύστημα μέχρι $2.79 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ στο παθητικό. Η εφαρμογή της εξίσωσης (3) έδωσε τιμές από $1.67 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ μέχρι $1.69 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ για το υβριδικό και παθητικό σύστημα αντίστοιχα.

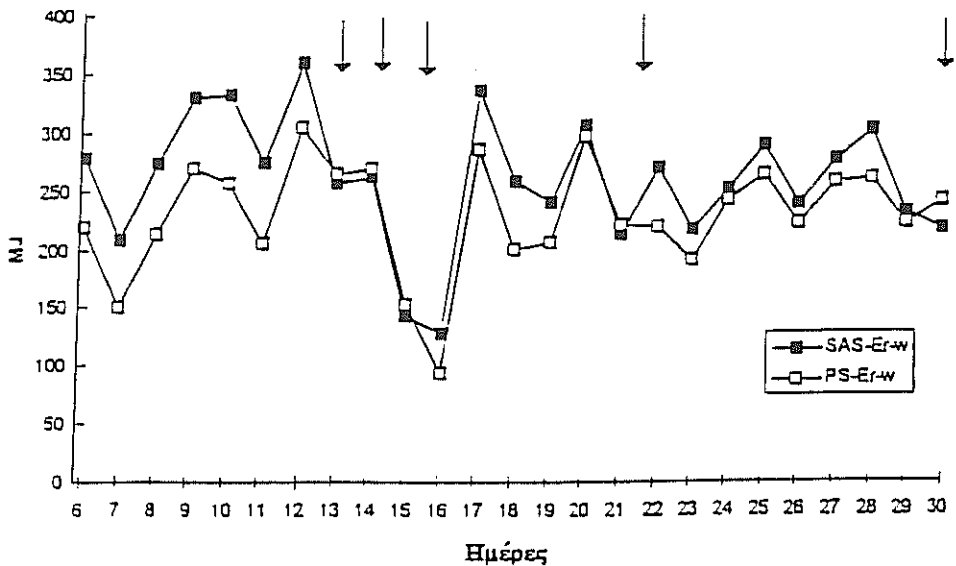


Σχήμα 3. Εβδομαδιαία μέση μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία νερού από τις 12 Δεκεμβρίου 1993 ως τις 29 Ιουνίου 1994.

Το βέλος με συνεχή γραμμή δείχνει το χρόνο έναρξης λειτουργίας του ανεμιστήρα, ενώ αυτό με την έντονη γραμμή δείχνει το χρόνο βαφής (σκίασης) των θερμοκηπίων.

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου από Φεβρουάριο μέχρι Απρίλιο έγιναν 278 μετρήσεις τις ώρες που οι σωλήνες πολυαιθυλενίου απέδιδαν θερμότητα στο περιβάλλον. Αυτό συνέβαινε περίπου από τις 20:00 απογευματινή ώρα μέχρι τις 7:00 πρωινή ώρα της επομένης, όταν η θερμοκρασία του νερού στους σωλήνες ήταν υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα.

Για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (6). Για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας με μεταφορά η εξίσωση (2), ενώ για τον συντελεστή θερμικής μεταφοράς οι εξισώσεις (3), (4) και (5). Τα πειραματικά δεδομένα βρήκαν καλή εφαρμογή στις εξισώσεις (3) και (5) αλλά η εξίσωση (5) ήταν πιο κοντά στην πραγματική απώλεια θερμότητας. Από την εφαρμογή αυτής της εξίσωσης ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς βρέθηκε να κυμαίνεται από $2.74 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ στο υβριδικό σύστημα μέχρι $2.79 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ στο παθητικό. Η εφαρμογή της εξίσωσης (3) έδωσε τιμές από $1.67 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ μέχρι $1.69 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ για το υβριδικό και παθητικό σύστημα αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Ημερήσια ενέργεια που απελευθερωνόταν (MJ) από το νερό των σωλήνων πολυαιθυλενίου στο διάστημα 6 - 30 Απριλίου 1994.

Το βέλος δείχνει τις ημέρες που ο ανεμιστήρας δεν λειτουργούσε ή λειτουργούσε για λίγα λεπτά.

Για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά χρησιμοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης και για τα δύο συστήματα. Βρέθηκε ότι η εξίσωση (5) είχε καλή εφαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, αφού το R^2 ήταν 0.9985 και 0.9992 και οι συντελεστές συσχέτισης 1.229 και 1.065, για το υβριδικό και το παθητικό σύστημα αντίστοιχα (Σχ.5.6).

Η συνολική θερμότητα που απελευθερώθηκε με μεταφορά και ακτινοβολία από τους σωλήνες στο υβριδικό σύστημα ήταν 5393 MJ ενώ η υπολογισθείσα ήταν 4451 MJ και 3852 MJ, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5) και (3) αντίστοιχα. Η συνολική θερμότητα από τους σωλήνες στο παθητικό σύστημα ήταν 4931 MJ ενώ οι υπολογισμοί έδωσαν τις τιμές 4684 MJ και 4040 MJ. Αυτό δείχνει ότι η θερμότητα που απελευθερώθηκε από τους σωλήνες πολυαιθυλενίου με νερό και η θερμότητα που υπολογίστηκε με την εξίσωση (5) ήταν πιο κοντά σε σύγκριση με τις τιμές που υπολογίσθηκαν με την εξίσωση (3).

Παρότι η υπολογισθείσα απώλεια θερμότητας από τις εξισώσεις (2),(5) και (6) βρέθηκε να έχει υψηλή συσχέτιση με την πραγματική απώλεια θερμότητας των δύο συστημάτων οι μεταξύ τους διαφορές θεωρήθηκαν μεγάλες. Αυτό έγινε με την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης :

$$q_{cv} = q_{loss} - q_r$$

Το q_{cv} υπολογίστηκε από τις εξισώσεις (2) και (5).

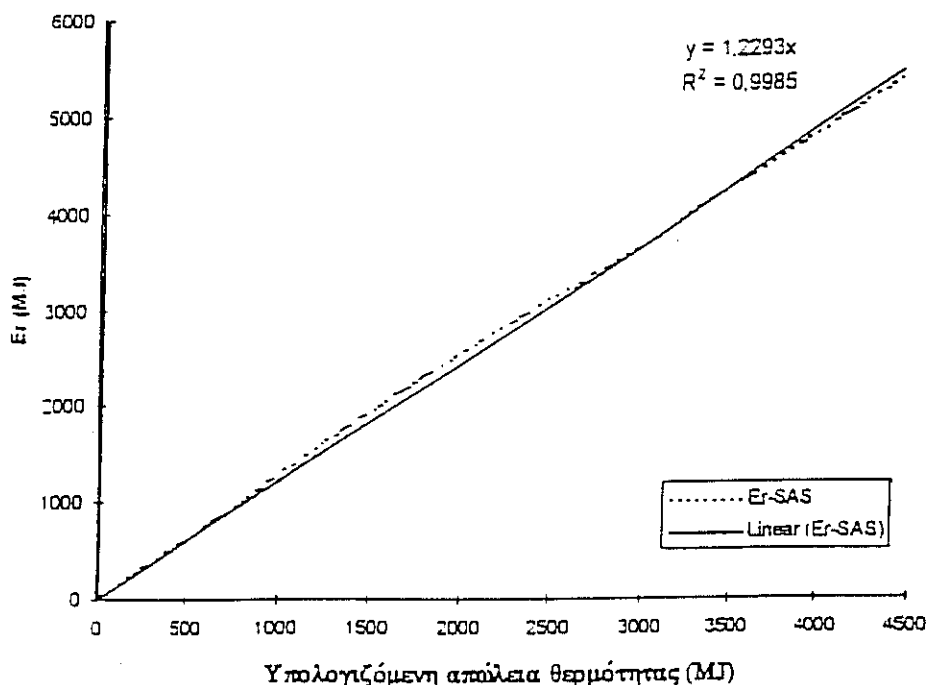
Κατόπιν υπολογίστηκε το q_{cv} βάσει των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα το q_{loss} από την εξίσωση (8) και το q_r από την εξίσωση (6).

Η υπολογισθείσα απώλεια με μεταφορά από τα πειραματικά δεδομένα ήταν μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα από τις εξισώσεις (2) και (5).

Κατόπιν τούτου, προτείνονται οι εξής μετατροπές για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής μεταφοράς.

Για το υβριδικό σύστημα : $h_{cv} = 2.07 \left((T_w - T_a) / d_{cv} \right)^{0.133}$

Για το παθητικό σύστημα : $h_{cv} = 1.47 \left((T_w - T_a) / d_{cv} \right)^{0.133}$



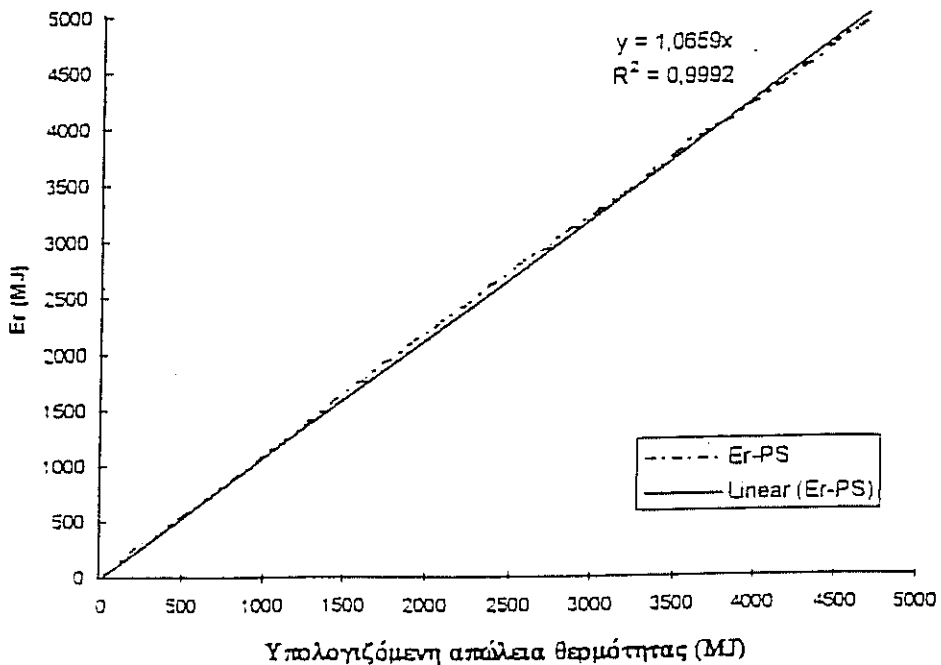
Σχήμα 5. Συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής απώλειας θερμότητας (E_r) από το νερό των σωλήνων πολυαιθυλενίου στο υβριδικό σύστημα (SAS) και της υπολογισθείσας απώλειας θερμότητας, χρησιμοποιώντας τους Μανρογιαποπουλος και Kyritsis (1993) και Jens (1994).

E_r : απελευθερωμένη ενέργεια

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υβριδικό σύστημα δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της θερμότητας που χάνεται από τον εξαερισμό με την ανύψωση της θερμοκρασίας των σωλήνων με νερό. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς ο θερμός αέρας που εξαναγκάζεται να κινηθεί πάνω από τους σωλήνες νερού προσθέτει θερμότητα με βεβαιωμένη μεταφορά και ανυψώνει τη θερμοκρασία του νερού.

Κατά την περίοδο που ο ανεμιστήρας λειτουργούσε στο υβριδικό σύστημα, η μέση θερμοκρασία του νερού ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με το παθητικό σύστημα. Γενικά, το υβριδικό σύστημα παρουσίασε υψηλότερη συλλογή και κατά συνέπεια απελευθέρωση ενέργειας απ' ότι το παθητικό, η οποία ανήλθε στο 20%, κατά τη διάρκεια της άνοιξης και όταν λειτουργούσε ο ανεμιστήρας.



Σχήμα 6. Συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής απώλειας θερμότητας (E_r) από το νερό των σωλήνων πολυαιθυλενίου στο παθητικό σύστημα (PS) και η εκτιμώμενη απώλεια θερμότητας, χρησιμοποιώντας τους Μανρογιανοπουλος και Kyritsis (1993) και Jens (1994).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Campbell, G. S. 1997. An introduction to Environmental Biophysics Springer - Verlag, New York Inc.
2. Hell, F., 1982. Grundlagen der Wärmeübertragung. (Basic of heat transfer). VDI - Verlag GmbH, Dusseldorf.
3. Holman, J. P., 1989. Heat transfer. McGraw - Hill Book Company, Singapore.
4. Jens, Th., 1994. Investigation for optimization and suitability of water - filled plastic tubes as collector and storage elements in greenhouse. PhD. Thesis, Hannover University.
5. Kanthak, J., 1970. The influence of different heating systems to the climatic characteristic of hall - buildings with great glass surfaces, especially of greenhouses. Fortschritt - Berichte. Reihe 6 N. 28.
6. Mavroyanopoulos, G. and Kyritsis, S., 1993. Analysis and performance of a greenhouse with water - filled passive solar sleeves. Agricultural and Forest Meteorology, 65.
7. Tantan, H. J., 1975. Der Einflub von Doppelbedachungen auf das Klima und den Warmehaushalt von Gewachshausern. Gartenbautechnische Information 4., Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft. Universität Hannover.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΦΙΛΜ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ (LDPE) ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΩΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΛΥΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΟΥ

Αδαμαντία Αριστοπούλου, Δημήτρης Μπριασούλης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών,
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της γήρανσης του πολυαιθυλενίου υπό την επίδραση κρίσιμων παραγόντων. Η επίδραση της τάσης εφελκυσμού είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος και μελετήθηκε κάτω από συνθήκες τεχνητής γήρανσης. Επίσης έγινε έκθεση του υλικού σε φυσικές συνθήκες γήρανσης, ακολουθώντας τις σχετικές διεθνείς προδιαγραφές. Το φιλμ πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκε στη πρώτη αυτή φάση της έρευνας ήταν καθαρό χωρίς την προσθήκη σταθεροποιητών. Η μελέτη αφορά τη μηχανική και χημική συμπεριφορά του πολυαιθυλενίου πριν και μετά την έκθεση σε συνθήκες γήρανσης.

THE EFFECT OF CRITICAL FACTORS ON THE AGEING OF POLYETHYLENE FILM (LDPE) AS A GREENHOUSE COVERING MATERIAL

Adamadia Aristopoulou, Demetres Briassoulis

Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Engineering,
Iera Odos 75, 11855 Athens Greece

ABSTRACT

The purpose of this research is the ageing of low density polyethylene affected by some critical factors. External stress is a very important variable of weathering and is studied under artificial conditions. The first approach of exposure of the polyethylene was performed on racks and at an inclination of 45°. The low density polyethylene tested was pure, without additives. The results obtained concerns the mechanical and chemical properties of the polyethylene before and after weathering.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πιο διαδεδομένο πολυμερές που χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης των θερμοκηπίων είναι το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας. Οι μηχανικές και οπτικές του ιδιότητες είναι σχετικά καλές [1]. Οι πιο σημαντικοί τύποι αποικοδόμησής του είναι:

- **Φωτο-οξειδωτική αποικοδόμηση**

Υπεύθυνη για αυτού του είδους την αποικοδόμηση είναι η υπεριώδης ακτινοβολία. Τα πολυμερή απορροφούν ακτινοβολία λόγω των χρωμοφόρων ομάδων που βρίσκονται μέσα στη μάζα τους [2,3]. Οι χρωμοφόρες ομάδες μπορεί να είναι υπόλοιπα καταλυτών, πρόσθετα, ίχνη μετάλλων, μεταλλικά οξειδία και γενικά προσμίξεις μέσα στη δομή του πολυμερούς. Μετά την έναρξη της αποικοδόμησης διάφορες οξειδωτικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στις άμορφες περιοχές του πολυμερούς.

- **Θερμική αποικοδόμηση**

Η θερμοκρασία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στην γήρανση αφού αυξάνει τον ρυθμό διάφορων χημικών αντιδράσεων. Ερευνητικά αποτελέσματα προτείνουν ότι ο ρυθμός της φωτο-οξείδωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και κατά προσέγγιση διπλασιάζεται για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 °C [3]. Επιπλέον, κυκλικές θερμοκρασιακές αλλαγές, όπως αυτές που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέρη του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της μέρας σε συνδυασμό με τις χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας, μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση του ρυθμού της θερμικής αποικοδόμησης [1].

- **Χημική αποικοδόμηση**

Μερικές φορές η μόλυνση του περιβάλλοντος και/ή η χρήση αγροχημικών στο θερμοκήπιο επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των πολυμερών μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται χημική αποικοδόμηση. Η μόλυνση του περιβάλλοντος μπορεί να είναι επιβλαβής για το πολυαιθυλένιο εξαιτίας της χημικής προσβολής των πολυμερικών δεσμών. Η ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως τα οξειδία του αζώτου, τα οξειδία του θείου, το όζον και οι υδρογονάνθρακες μπορούν να προάγουν την αποικοδόμηση [1]. Τα πιο κοινά αγροχημικά που χρησιμοποιούνται σήμερα, περιέχουν ενώσεις του θείου και αλογόνων. Δοκιμές έδειξαν ότι συνδυασμοί αγροχημικών μπορούν να επιταχύνουν την αποικοδόμηση των φύλλων του πολυαιθυλενίου και να περιορίσουν τη διάρκεια ζωής του ως υλικού κάλυψης των θερμοκηπίων [4].

- **Μηχανική αποικοδόμηση**

Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών εξαρτώνται από το υψηλό μοριακό τους βάρος, την κρυσταλλικότητά τους, την παρουσία διακλαδώσεων και τις διασταυρώσεις που έχουν. Μερικές από τις πιο σημαντικές αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα πολυμερές που ακτινοβολείται αφορούν τις μηχανικές του ιδιότητες [5]. Πάντως αυτές οι ιδιότητες δεν αλλάζουν με τον ίδιο ρυθμό, όταν συμβαίνουν οι διάφορες χημικές αντιδράσεις (φωτο-οξείδωση κ.α.) στο πολυμερές.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η κατανόηση των μηχανισμών της γήρανσης του καθαρού πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (χωρίς σταθεροποιητές). Για το λόγο

αυτό το πολυαιθυλένιο εκτέθηκε σε συνθήκες φυσικής και τεχνητής γήρανσης. Η μελέτη των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων του υλικού χωρίς σταθεροποιητές πριν και μετά την έκθεση μας επιτρέπει να παρακολουθήσουμε σε μικρή χρονική διάρκεια τις μεταβολές τους σε συνάρτηση με το χρόνο.

3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

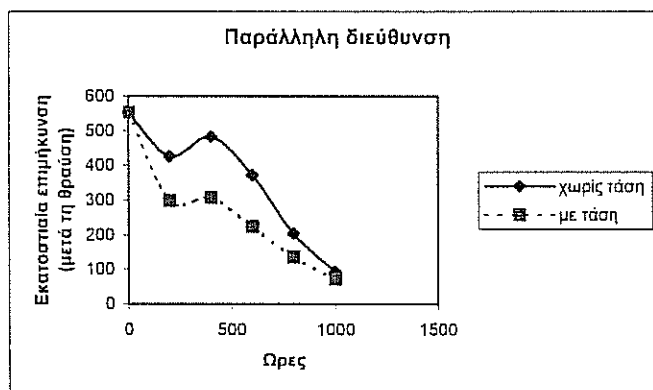
Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε καθαρό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (χωρίς σταθεροποιητές), πάχους 200 μμ. Όλα τα δείγματα εκτέθηκαν σε συνθήκες τεχνητής γήρανσης κατά το πρότυπο ASTM G26. Οι συνθήκες έκθεσης ήταν οι ακόλουθες:

Λαμπτήρας	: τόξο ξένου
Ακτινοβολία	: 0.35 W/m ²
Θερμοκρασία μαύρης πλάκας	: 63 °C
Σχετική υγρασία	: 30%
Ξηρός κύκλος	

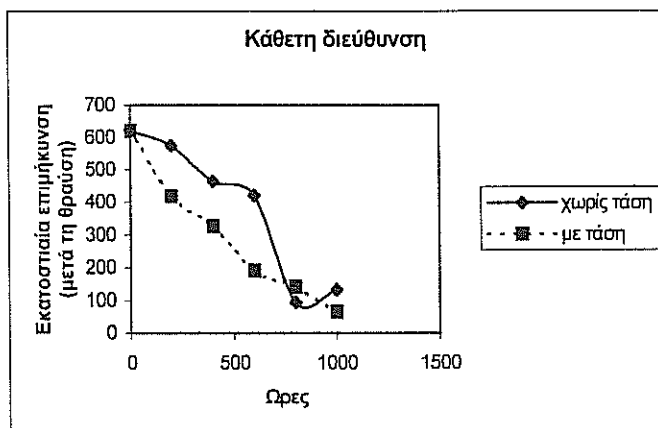
Η διάρκεια έκθεσης ξεκινούσε από 200 ώρες και έφτανε μέχρι και τις 1000 ώρες συνολικής έκθεσης, με τμηματική αύξηση ανα 200 ώρες. Δέκα δείγματα προεντάθηκαν μέχρι το 50% της μετρούμενης τάσης διαρροής τους. Η προ-ένταση πραγματοποιήθηκε σε μηχανή εφελκυσμού και στην συνέχεια τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα κατασκευασμένα διπλά πλαίσια από ανοξείδωτο ατσάλι. Άλλα δέκα δείγματα τοποθετήθηκαν στα ειδικά πλαίσια χωρίς προ-ένταση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- **μηχανικές ιδιότητες**

Η ιδιότητα εφελκυσμού που παρουσιάστηκε να είναι περισσότερο ευαίσθητη σε αυτήν την έκθεση είναι η εκατοστιαία επιμήκυνση μετά τη θραύση. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται αυτή η συμπεριφορά.



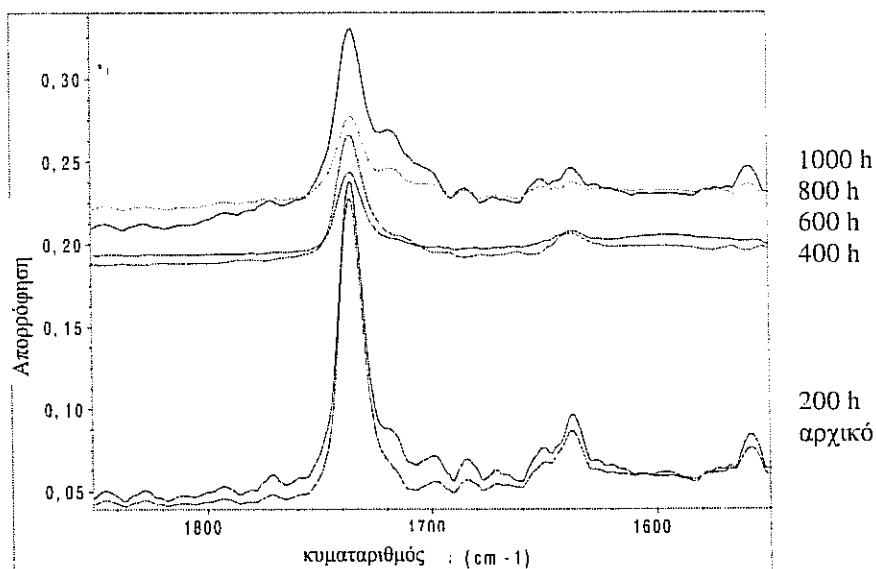
Σχήμα 1: Εκατοστιαία επιμήκυνση σε σχέση με τις ώρες έκθεσης για τα δείγματα χωρίς τάση και με τάση (παράλληλη διεύθυνση).



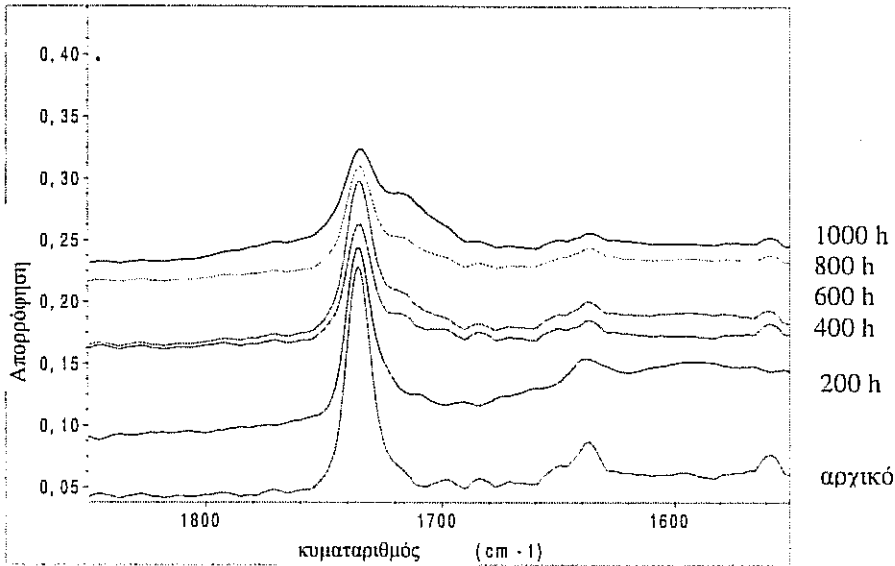
Σχήμα 2: Εκατοστιαία επιμήκυνση σε σχέση με τις ώρες έκθεσης για τα δείγματα χωρίς τάση και με τάση (κάθετη διεύθυνση).

• *χημικές ιδιότητες*

Οι χημικές ιδιότητες μελετήθηκαν σε φασματοφωτόμετρο FTIR. Η περιοχή που έχει υποστεί τις σημαντικότερες αλλαγές είναι η περιοχή των καρβονυλίων. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι αλλαγές του καθαρού υλικού σε σχέση με το γηρασμένο. Είναι φανερό ότι τα δείγματα υπό τάση έχουν υποστεί πιά έντονη φωτο-οξειδωτική αποικοδόμηση καθώς τα παρα-προϊόντα της (καρβονύλια) παρουσιάζονται αυξημένα.



Σχήμα 3: Περιοχή καρβονυλίων (υλικό χωρίς τάση, εκτεθειμένη πλευρά).



Σχήμα 4: Περιοχή καρβονυλίων (υλικό με τάση, εκτεθειμένη πλευρά).

4. ΦΥΣΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Για την έκθεση σε φυσικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε καθαρό πολυαιθυλένιο πάχους 100 μm και 200 μm . Η έκθεση είχε διάρκεια 10 εβδομάδες (κατά τους μήνες Ιούλιο έως Σεπτέμβριο) και τα πλαστικά εκτέθηκαν υπό γωνία 45°. Τα αποτελέσματα των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων παρουσιάζονται παρακάτω.

- **μηχανικές ιδιότητες**

Η φυσική γήρανση συνοδεύεται από σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και κυρίως από δραματική μείωση της εκατοστιαίας επιμήκυνσης μετά τη θραύση. Το μικρότερο πάχος φιλμ παρουσιάζεται πιο ευαίσθητο στη διαδικασία της γήρανσης.

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες του πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (100 μm .)

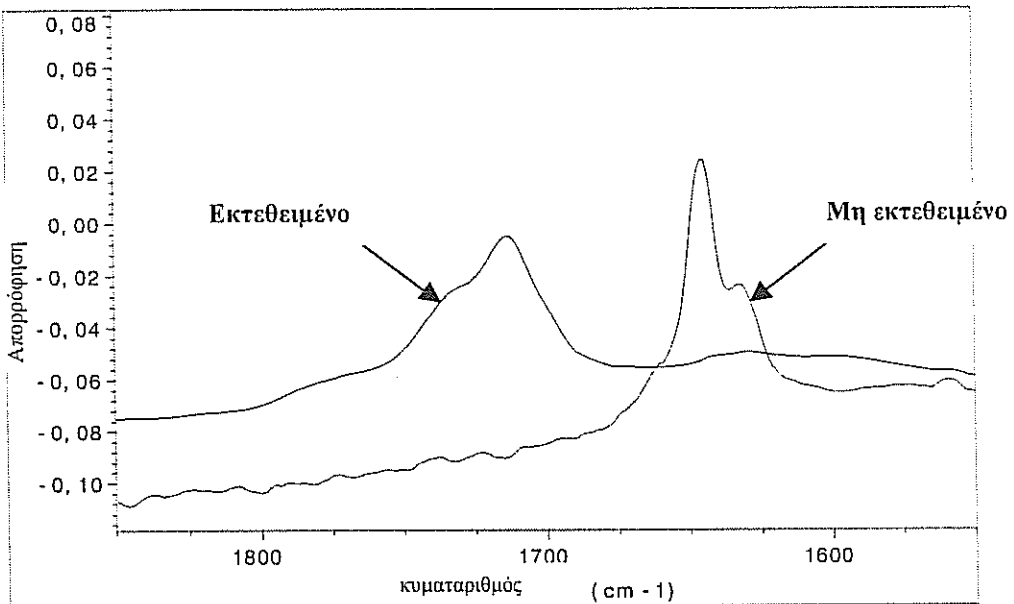
100 μm						
<i>Παράλληλη διεύθυνση</i>						
Εβδομάδες	Τάση στο όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση στο όριο διαρροής (%)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Τάση στο μέγιστο φορτίο (KN)	Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Επιμήκυνση στη θραύση (%)
0	9,1 (0,4)	25,9 (0,4)	171,6 (13)	15,6 (1,8)	3,8 (0,6)	380,4 (56)
10	11,4 (0,1)	24,9 (0,7)	265,9 (14,0)	16,0 (0,2)	0,2 (0,0)	84,0 (35,8)
<i>Κάθετη διεύθυνση</i>						
Εβδομάδες	Τάση στο όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση στο όριο διαρροής (%)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Τάση στο μέγιστο φορτίο (KN)	Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Επιμήκυνση στη θραύση (%)
0	8,8 (0,1)	25,8 (0,2)	166,1 (4,4)	17,6 (2,8)	4,6 (0,7)	461,0 (70,0)
10	10,8 (0,7)	24,3 (0,4)	265,6 (20,8)	15,7 (0,1)	0,2 (0,0)	67,1 (17,4)

Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες του πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (200 μm .)

200 μm						
			Παράλληλη διεύθυνση			
Εβδομάδες	Τάση στο όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση στο όριο δαιρροής (%)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Τάση στο μέγιστο φορτίο (KN)	Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Επιμήκυνση στη θραύση (%)
0	6,9 (0,1)	28,2 (0,4)	85,9 (2,9)	26,0 (1,1)	5,5 (0,2)	552,7 (18,1)
10	7,7 (0,1)	27,4 (0,6)	110,3 (2,8)	10,4 (1,9)	1,9 (1,9)	289,8 (114,6)
			Κάθετη διεύθυνση			
Εβδομάδες	Τάση στο όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση στο όριο δαιρροής (%)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Τάση στο μέγιστο φορτίο (KN)	Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Επιμήκυνση στη θραύση (%)
0	6,4 (0,1)	27,4 (0,8)	88,6 (5,4)	25,3 (2,2)	6,2 (0,3)	621,5 (32,1)
10	7,5 (0,1)	26,9 (0,5)	118,9 (1,5)	9,5 (0,9)	1,3 (1,6)	298,7 (67,5)

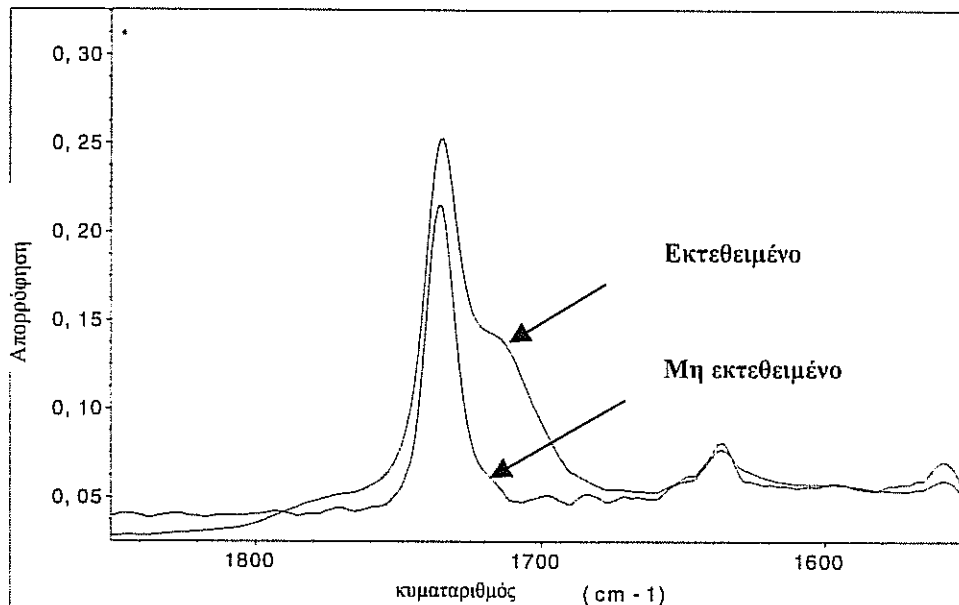
• χημικές ιδιότητες

Και σε αυτή την περίπτωση η περιοχή των καρβονυλίων έδειξε τις σημαντικότερες αλλαγές στην μακρομοριακή δομή του υλικού. Στην περίπτωση του πολυαιθυλενίου



Σχήμα 5: Περιοχή καρβονυλίων (πολυαιθυλένιο 100 μm).

των 200 μm η μεταβολή παρουσιάζεται ποιοτικά παρόμοια με εκείνη της τεχνητής γήρανσης. Πάντως, οι μεταβολές υπό συνθήκες τεχνητής γήρανσης προσομοιάζουν τις αντίστοιχες μεταβολές υπό συνθήκες φυσικής γήρανσης, ανηγμένες στην αντίστοιχη έκθεση υπεριώδους ακτινοβολίας.



Σχήμα 6: Περιοχή καρβονυλίων (πολυαιθυλένιο 200 μm).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας τα αποτελέσματα και των δύο ειδών γήρανσης μπορούμε να καταλήξουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

Από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων δύο ιδιότητες παρουσίασαν σημαντικές αλλαγές ανάμεσα στο αρχικό και το γηρασμένο υλικό. Το μέτρο ελαστικότητας έδειξε ότι αυξάνεται σημαντικά ενώ η εκατοστιαία επιμήκυνση στη θραύση μειώνεται [6]. Επίσης πολύ σημαντική είναι η επίδραση της τάσης εφελκυσμού στο υλικό αφού φαίνεται ότι η μεταβολή των παραπάνω ιδιοτήτων είναι πιο έντονη για το υλικό που έχει υποστεί την προ-ένταση.

Από πλευράς χημικών ιδιοτήτων οι περιοχές που έδειξαν ότι επηρεάστηκαν περισσότερο είναι η περιοχή των ομάδων του καρβονυλίου και η περιοχή της ομάδας άνθρακα-υδρογόνου λόγω δονήσεων παραμόρφωσης [6]. Στη δε πρώτη περιοχή είναι ολοφάνερο ότι με την πάροδο του χρόνου γήρανσης σχηματίζονται και άλλες ομάδες καρβονυλίου πέρα από αυτές που προυπήρχαν στο αρχικό υλικό. Στη δεύτερη περιοχή, η οποία σχετίζεται και με την κρυσταλλικότητα του υλικού, φαίνεται ότι γίνεται μια αλλαγή στην τακτοποίηση των μακρομοριακών αλυσίδων με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της κρυσταλλικότητας του υλικού [6].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: P.A.Dilara and D. Briassoulis, "Degradation and Stabilization of Low Density Polyethylene(LDPE) Films Used as Greenhouse Covering Materials", A7(1998).
- [2]: P.A.Dilara and D. Briassoulis, "Standard Testing Methods for Mechanical Properties and Degradation of Low Density Polyethylene (LDPE) Films Used as Greenhouse Covering Materials", *Polymer Testing*, 17, 549-585, (1998).
- [3]: Jan F. Rabek, *Photodegradation of polymers. Physical Characteristics and Applications*, Springer, Berlin, 1996.
- [4]: F. Henninger and E. Pedrazzetti, *Plasticulture*, N° 86 (1990/2), 6-20.
- [5]: M.B. Amin, H.S. Hamid and J.H. Khan, *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 14, No 4, 253-267, (1995).
- [6]: Αριστοπούλου Αδαμαντία, *Επίδραση κρίσιμων παραγόντων στη γήρανση φιλμ πολυαιθυλενίου (LDPE) κατά τη χρήση του σαν υλικό κάλυψης θερμοκηπίου*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΓΠΑ, 2000.

Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς LDPE φύλλων θερμοκηπίου

Δ. Μπριασούλης και E. Schettini¹

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μηχανική συμπεριφορά LDPE φύλλων θερμοκηπίου προσομοιώνεται με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο που αναπτύσσεται βασίζεται στη αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά και ιδιότητες που μετρώνται στο εργαστήριο με εφαρμογή προτύπων μεθόδων ελέγχου. Η συμπεριφορά συγκεκριμένων πεπερασμένων στοιχείων όπως το στοιχείο μεμβράνης και το στοιχείο κελύφους με μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις εξετάζεται σε σχέση με την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της συμπεριφοράς του φύλλου κάτω από συνθήκες εργαστηριακού ελέγχου.

Numerical simulation of the mechanical behaviour of greenhouse LDPE film

D. Briassoulis and E. Schettini¹

Agricultural University of Athens
Department of Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855 Athens

SUMMARY

The mechanical behaviour of the LDPE film material is simulated using the finite element method of analysis. The model developed is based on the corresponding behaviour and the mechanical properties obtained in the laboratory by applying standard testing methods. The performance of specific finite elements, such as a membrane shell and a plastic large strain shell element, is investigated with respect to the best possible simulation of the film's behaviour under testing configurations.

¹ *Post doctoral fellow supported by the European Commission (SMT4- CT98-9034, DG 12-RSMT)*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οικονομικές και τεχνικές εξελίξεις του τελευταίου αιώνα έχουν προάγει μια συνεχή ανάπτυξη και διάδοση της χρήσης πλαστικών στη γεωργία λόγω των καλών τους μηχανικών ιδιοτήτων, την ευκολία μορφοποίησής τους και του χαμηλού κόστους τους [1, 2]. Η χρήση προϊόντων καλής ποιότητας με προβλεπόμενο χρόνο ζωής απαιτείται στις θερμοκηπιακές κατασκευές που καλύπτονται με πλαστικά φύλλα για να επιτευχθεί αυξημένη ποιοτικά και ποσοτικά παραγωγή και να αποφευχθούν διάφορα προβλήματα σχετικά με τον σχεδιασμό των θερμοκηπίων, την πρόωρη γήρανση των υλικών κάλυψης και την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων πλαστικών αποβλήτων που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν σχετικά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Στη Νότια Ευρώπη, φύλλα πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) αποτελούν το κυρίαρχο υλικό κάλυψης θερμοκηπίων. Το υλικό LDPE χαρακτηρίζεται ως θερμοπλαστικό, ημι-κρυσταλλικό υλικό [2- 6].

Μεταξύ όλων των ιδιοτήτων των πλαστικών υλικών, οι μηχανικές ιδιότητες είναι συχνά οι πιο σπουδαίες επειδή τελικά όλες οι συνθήκες λειτουργίας και η πλειονότητα των εφαρμογών τελικού-χρήστη περιλαμβάνουν κάποιο βαθμό μηχανικής καταπόνησης [7- 12]. Ειδικά για τα πλαστικά φύλλα θερμοκηπίου, η λειτουργία τους ως στοιχείων ανάληψης και ανακατανομής φορτίου, απαιτεί να μην παραμορφώνονται σε συνθήκες λειτουργίας πέρα από όρια που περιγράφονται από λειτουργικές ανάγκες και να μην αστοχούν με θραύση, σχίσσιμο, ή άλλους τρόπους, μέσα στον προσδοκώμενο χρόνο ζωής τους.

Η κατανόηση της συμπεριφοράς και ανταπόκρισης των πλαστικών φύλλων κάτω από φορτία είναι σημαντική για τον έλεγχο ποιότητας και επιτρέπει συγκρίσεις διαφόρων εναλλακτικών υλικών. Η κατανόηση αυτή της μηχανικής συμπεριφοράς επιτρέπει να παρέχονται στον χρήστη οι βασικές μηχανικές ιδιότητες, ή μηχανικές ιδιότητες αναφοράς, όπως είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, σχίσσιμο και κρούση, ερπυσμό και κόπωση και τα σχετικά μέτρα ελαστικότητας που απαιτούνται για σκοπούς ανάλυσης και σχεδιασμού. Παράγοντες όπως ο ρυθμός μεταβολής του εφαρμοζόμενου φορτίου και η ιστορία της καταπόνησης με τάσεις, η θερμοκρασία και οι εξωτερικές συνθήκες, τα χημικά πρόσθετα και ο προσανατολισμός των μακρομορίων επηρεάζουν τις ιδιότητες αυτές.

Η έρευνα της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στα φύλλα LDPE κάτω από διάφορες συνθήκες φόρτισης θεωρείται ότι αποτελεί σημαντικό θέμα αναφορικά με την σωστή τους χρήση ως υλικών κάλυψης θερμοκηπίων. Η παρούσα εργασία αντιπροσωπεύει μια πρώτη προσπάθεια να προσομοιωθεί η μηχανική συμπεριφορά των LDPE φύλλων θερμοκηπίων με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιείται βασίζεται στην συμπεριφορά και τις μηχανικές ιδιότητες που μετρήθηκαν στο εργαστήριο με την εφαρμογή διεθνών προτύπων μέτρησης των αντίστοιχων μηχανικών ιδιοτήτων.

2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ LDPE ΦΥΛΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Οι Dilara και Briassoulis [13] έχουν περιγράψει κριτικά τις διάφορες μεθόδους για έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων LDPE φύλλων θερμοκηπίων. Οι μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών φύλλων προσδιορίζονται κυρίως με έλεγχο των εφελκυστικών ιδιοτήτων με βάση πρότυπες μεθόδους δοκιμών. Πρόσθετοι έλεγχοι που γίνονται συνήθως για εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πλαστικών φύλλων περιλαμβάνουν δοκιμές αντοχής σε σχίσσιμο, αντοχής σε κρούση και συμπεριφοράς ερπυσμού. Οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται μπορεί όμως να ποικίλουν (εξαρτώμενοι από τα πρότυπα και τις συγκεκριμένες μεθόδους δοκιμών που

επιλέγονται). Σε ορισμένες περιπτώσεις, ακατάλληλες μέθοδοι χρησιμοποιούνται δίνοντας λάθος τιμές των ιδιοτήτων που μετρώνται, ή οι τιμές που επιτυγχάνονται δεν ορίζονται ή δεν αναφέρονται σωστά [13].

Η συμπεριφορά παραμορφώσεων των πλαστικών μελετάται με βάση τις σχέσεις τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων. Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που επιτυγχάνεται από την απλή δοκιμή εφελκυσμού δίνει πληροφορίες για τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, τον χαρακτήρα και την έκταση της πλαστικής του παραμόρφωσης και την αντοχή του σε εφελκυσμό και διαρροή. Η δοκιμή αυτή του εφελκυσμού δεν παίρνει υπόψη την χρονική εξάρτηση των ιδιοτήτων του υλικού. Στην παρούσα εργασία δεν μελετάται η χρονική εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς των φύλλων LDPE (βίσκο-ελαστική συμπεριφορά π.χ. συμπεριφορά ερπυσμού).

Το πολυαιθυλένιο παρουσιάζει διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων εφελκυσμού τυπικά ενός μαλακού και ανθεκτικού υλικού με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, χαμηλή τάση διαρροής αλλά πολύ υψηλή επιμήκυνση και τάση θραύσης [8].

Παράγοντες του φυσικού περιβάλλοντος, όπως βροχή, χαλάζι υπερϊώδης ακτινοβολία, ακραίες θερμοκρασίες και άλλοι, καθώς και του τεχνητού περιβάλλοντος, όπως χημικά, υψηλές θερμοκρασίες και άλλοι, παίζουν σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες, τη διάρκεια ζωής και τον τρόπο αστοχίας των πλαστικών φύλλων. Ιδιαίτερα η επίδραση παραγόντων του φυσικού περιβάλλοντος και του μικρο-περιβάλλοντος των θερμοκηπίων, που αναφέρονται ως γήρανση, είναι επιζήμια για τις μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών [14].

Τα πραγματικά υλικά είναι πάντοτε ανισότροπα: σε μερικές περιπτώσεις οι διαφορές των ιδιοτήτων στις διαφορετικές διευθύνσεις είναι μικρές και το υλικό μπορεί να θεωρηθεί ως ισότροπο ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις αυτές οι διαφορές είναι τόσο μεγάλες ώστε η ανάλυση η οποία υποθέτει συμπεριφορά ισότροπου υλικού δεν μπορεί να θεωρηθεί πια λογική προσέγγιση [15]. Αυτή είναι και η περίπτωση του φύλλου πολυαιθυλενίου μια και η διαδικασία επεξεργασίας του υλικού κατά την διάρκεια της παραγωγής του εισάγει ανισοτροπία. Μία από τις κύριες διευθύνσεις είναι η αποκαλούμενη διεύθυνση μηχανής (δηλ. η διεύθυνση κατά μήκος του σωλήνα που δημιουργείται κατά την εξώθηση) ενώ η άλλη κύρια διεύθυνση είναι η εγκάρσια διεύθυνση (δηλ. η διεύθυνση κατά την περιφέρεια του σωλήνα του φύλλου).

Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για ανισότροπα γραμμικά ελαστικά υλικά δίνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_z \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= G_{xy} \gamma_{xy} \\ \tau_{yz} &= G_{yz} \gamma_{yz} \\ \tau_{zx} &= G_{zx} \gamma_{zx} \end{aligned} \quad (2)$$

όπου σ_x , σ_y και σ_z είναι οι τάσεις στην κατά μήκος (x), την εγκάρσια (y) και την κατά το πάχος του φύλλου (z) διεύθυνση, ενώ, τ_{xy} , τ_{yz} και τ_{zx} είναι οι διατμητικές τάσεις στα επίπεδα xy, yz και xz. Ομοίως, ε_i και E_i ($i = x, y, z$) είναι η ανηγμένη παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση i , αντίστοιχα, ενώ γ_{ij} και G_{ij} ($i \neq j$; $i, j = x, y, z$) είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις και το διατμητικό μέτρο ελαστικότητας στο επίπεδο ij , αντίστοιχα. Οι λόγοι του Poisson's στο επίπεδο ij , $\nu_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$ και $\nu_{ji} = -\varepsilon_i / \varepsilon_j$ σχετίζονται με τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας ως εξής [15]:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (3)$$

και το διατμητικό μέτρο ελαστικότητας G_{ij} υπολογίζεται ως εξής [15]:

$$G_{ij} = \frac{(1 + \nu_{ij})E_i + (1 + \nu_{ji})E_j}{4(1 + \nu_{ij})(1 + \nu_{ji})} \quad (4)$$

όπου $i \neq j$ και $i, j = x, y, z$.

Οι εξισώσεις (1-2) απλοποιούνται αν η γεωμετρία του υλικού μπορεί να περιγραφεί στο επίπεδο x-y, έχοντας σχετικά μικρό πάχος στην διεύθυνση z. Σε αυτή την περίπτωση $\sigma_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{yx} = 0$ [2]. Οι υποθέσεις για επίπεδη ένταση είναι ακριβείς μόνο αν το στοιχείο έχει σταθερό πάχος και για σώματα με μικρό πάχος που υπόκεινται σε φορτία και παραμορφώσεις επί του επιπέδου τους. Για ισότροπα υλικά $E_x = E_y = E_z = E$; $\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz} = \nu$ και $G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = G$.

3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ LDPE

Το μοντέλο του υλικού που έχει αναπτυχθεί βασίζεται στην αντίστοιχη συμπεριφορά και τις μηχανικές ιδιότητες που μετρώνται στο εργαστήριο με την εφαρμογή μεθόδων δοκιμών που δίδονται από διεθνείς κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, οι ιδιότητες εφελκυσμού μετρήθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου δοκιμής του κανονισμού ASTM D 882 [16] (ή την αντίστοιχη της ISO 1184 [17]), η οποία είναι κατάλληλη για φύλλα πάχους μικρότερου από 0.25 mm. Η βασική διαδικασία της μεθόδου συνίσταται στη χρήση δοκιμών με τη μορφή λωρίδων ομοιόμορφου πλάτους και πάχους υπό το κλασικό σχήμα δοκιμής εφελκυσμού. Ειδικές προβλέψεις λαμβάνονται όσον αφορά τις εξειδικευμένες αρπάγες που απαιτούνται ώστε να αποφεύγονται προβλήματα ολίσθησης των λεπτών φύλλων LDPE ή θραύσης στο επίπεδο των αρπαγών, οδηγώντας σε πρόωρη αστοχία [18]. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών [18] για ένα τυπικό φύλλο LDPE θερμοκηπίου παρουσιάζονται στα σχήματα 1 και 2, με τη μορφή των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων, για την παράλληλη και εγκάρσια διεύθυνση, αντίστοιχα.

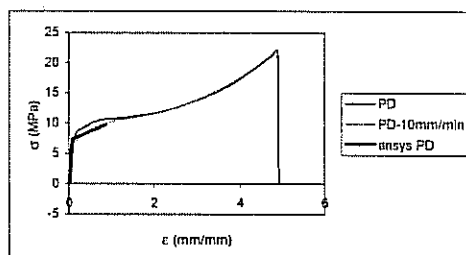
Οι ιδιότητες εφελκυσμού, σύμφωνα με τους ορισμούς της αναφοράς [18], δίνονται στον Πίνακα 1. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας και οι σχετικές με αυτό ιδιότητες μετρώνται με την εφαρμογή χαμηλού ρυθμού μεταβολής

παραμορφώσεων (10 mm/min) ενώ οι υπόλοιπες ιδιότητες εφελκυσμού υπολογίζονται με την χρήση μικρού μήκους δοκιμίων με υψηλό ρυθμό μεταβολής παραμορφώσεων (500 mm/min) [18]. Οι εκτιμώμενες τιμές του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του διαγράμματος μετά την διαρροή, E'_i , βασίζονται στις ακόλουθες υποθέσεις:

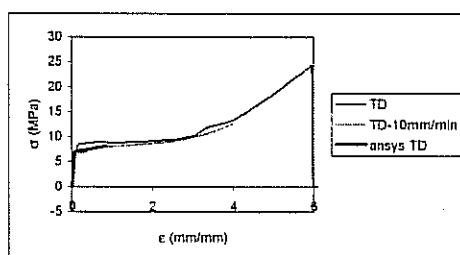
- Στην παράλληλη διεύθυνση, το τμήμα της καμπύλης μετά το (ονομαστικό) σημείο διαρροής και μέχρι το σημείο της μέγιστης τάσης (αντοχής σε εφελκυσμό) θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει συμπεριφορά γραμμικής κράτνυσης (Σχήμα 1). Έτσι, η συμπεριφορά του φύλλου στην παράλληλη διεύθυνση εξιδανικεύεται με ένα πρότυπο ελαστοπλαστικού υλικού με γραμμική κράτνυση.
- Στην εγκάρσια διεύθυνση, το τμήμα της καμπύλης μετά το σημείο διαρροής μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει συμπεριφορά διγραμμικής κράτνυσης. Το πρώτο γραμμικό τμήμα της κράτνυσης έχει πολύ χαμηλό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας μέχρι μια τιμή παραμόρφωσης ίσης με το μισό της επιμήκυνσης θραύσης (παραμόρφωση 300%) και ακολουθείται από ένα γραμμικό τμήμα κράτνυσης με πιο απότομη κλίση μέχρι το σημείο της μέγιστης τάσης (Σχήμα 2). Για τους σκοπούς της ανάλυσης, υποθέτοντας ότι οι παραμορφώσεις παραμένουν σχετικά χαμηλές, η συμπεριφορά του φύλλου στην εγκάρσια διεύθυνση εξιδανικεύεται επίσης με πρότυπο ελαστοπλαστικού υλικού με γραμμική κράτνυση (χρησιμοποιώντας για την κράτνυση το χαμηλό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας του πρώτου τμήματος της πραγματικής διγραμμικής κράτνυσης).

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικού: τιμές που μετρήθηκαν στο εργαστήριο εφαρμόζοντας κανονισμούς δοκιμών εφελκυσμού και εκτιμώμενες τιμές (*).

Διεύθυνση -i	E_i [MPa]	E'_i [MPa]	σ_i διαρροής [MPa]	επίπεδο ij	G_{ij}	ν_{ij}
x	93.928	3.033	7.38	xy	35.77347*	0.424*
y	106.130	1.102	7.00	xz	34.6477*	0.412*
z	100.029*	2.067*	7.19*	yz	36.82595*	0.411*



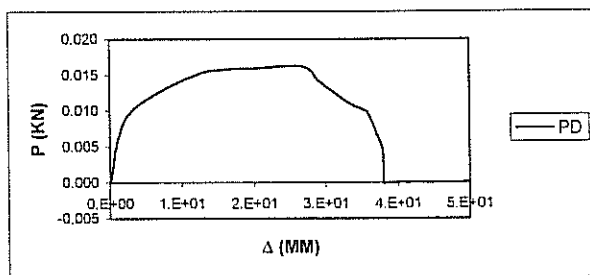
Σχήμα 1: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στην παράλληλη διεύθυνση (PD) για φύλο πολυαιθυλενίου θερμοκηπίου LDPE.



Σχήμα 2: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στην εγκάρσια διεύθυνση (TD) για φύλο πολυαιθυλενίου θερμοκηπίου LDPE.

Από μηχανικής άποψης, το φύλλο πολυαιθυλενίου είναι μεμβράνη. Έτσι η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του φύλλου πολυαιθυλενίου LDPE είναι ισοδύναμη με εκείνη μεμβράνης που αποτελείται από υλικό με τις ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 1. Το ερώτημα εδώ αφορά τη χρήση κατάλληλων προτύπων που να προσομοιώνουν αυτή τη συμπεριφορά μεμβράνης του συγκεκριμένου φύλλου σωστά. Ένας τρόπος για την εκτίμηση τέτοιων προτύπων μεμβράνης είναι μέσω αριθμητικής προσομοίωσης ειδικών εργαστηριακών δοκιμών και σύγκρισης των

αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στο εργαστήριο. Επειδή η μεμβράνη δεν έχει αντίσταση σε θλίψη, αναζητήθηκε μια εργαστηριακή δοκιμή η οποία εισάγει σύμπλοκη εντατική κατάσταση, συμπεριλαμβανομένων θλιπτικών τάσεων. Μια τέτοια δοκιμή είναι εκείνη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της αντοχής σε έναρξη σχισίματος, μιας ιδιότητας που είναι σημαντική για το φύλλο πολυαιθυλενίου LDPE. Η έναρξη του σχισίματος μετράται με την συμβατική μηχανή δοκιμής εφελκυσμού σε όρους δύναμης για έναρξη και διάδοση του σχισίματος [13]. Το δοκίμιο έχει ένα ιδιαίτερο σχήμα που επιτρέπει την ανάπτυξη συγκεντρώσεων τάσεων σε συγκεκριμένη περιοχή όπου έχουμε και έναρξη σχισίματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δοκιμής έναρξης σχισίματος του κανονισμού ASTM-D 1004 [19] (ή του ισοδύναμου ISO 34-1 [20]). Ένα τυπικό διάγραμμα από δοκιμή στο εργαστήριο [18] παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



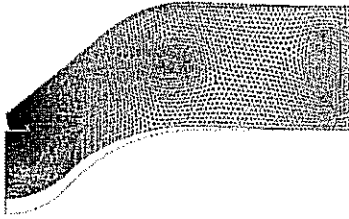
Σχήμα 3: Διάγραμμα δύναμης (P)-μετατόπισης (Δ) από δοκιμή έναρξης σχισίματος στο εργαστήριο.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

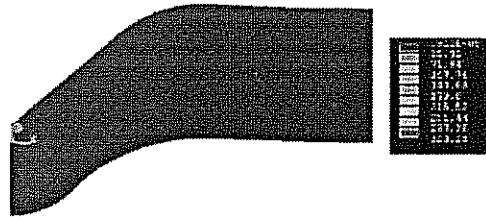
Η μηχανική συμπεριφορά του φύλλου πολυαιθυλενίου LDPE προσομοιώνεται με τη μέθοδο ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων [21]. Η συμπεριφορά δύο συγκεκριμένων στοιχείων, ενός στοιχείου κελύφους-μεμβράνης και ενός στοιχείου κελύφους μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων, εξετάστηκαν αναφορικά με την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της συμπεριφοράς του φύλλου πολυαιθυλενίου LDPE υπό τις αντίστοιχες διατάξεις ελέγχου των δοκιμών. Το στοιχείο μεμβράνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για γραμμική ελαστική ανάλυση. Το στοιχείο κελύφους επιτρέπει προσομοίωση της πλαστικής συμπεριφοράς αλλά υπάρχει ανάγκη έμμεσης εισαγωγής τεχνητής δράσης μεμβράνης.

Πρότυπα δοκιμών φύλλου πολυαιθυλενίου συγκεκριμένης γεωμετρίας (δοκιμών εφελκυσμού και έναρξης σχισίματος) με ιδιότητες ανισότροπου υλικού (Πίνακας 1), μελετήθηκαν αριθμητικά υπό ανάλογες οριακές συνθήκες και εφαρμόζοντας διαφορετικές εναλλακτικές επιλογές ανάλυσης όπως γραμμική ελαστική ανάλυση, δράση μεμβράνης και πλαστικότητα. Γεωμετρικές μη-γραμμικότητες όπως μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις δεν έχουν εισαχθεί στην ανάλυση στην παρούσα φάση. Χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά δεν συμπεριλαμβάνεται στην εργασία αυτή.

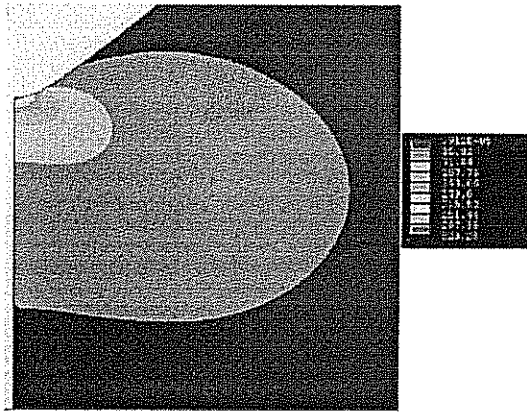
Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης εργαστηριακών δοκιμών εφελκυσμού παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 και 2. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση ελαστο-πλαστικού προτύπου με γραμμική κράτυνση προσομοιώνει ρεαλιστικά τις εργαστηριακές δοκιμές (σε εγκάρσια διεύθυνση, μέχρις μιας μέγιστης τιμής παραμορφώσεων ίσης με την μισή τιμή της επιμήκυνσης θραύσης).



Σχήμα 4: Αρχικό και παραμορφωμένο πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 5: Τάσεις κατά τη διεύθυνση φόρτισης.



Σχήμα 6: Τάσεις κατά τη διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος του δοκιμίου.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της δοκιμής έναρξης σχισίματος με την χρήση του στοιχείου μεμβράνης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-6. Το αρχικό (διακεκομμένη γραμμή) και παραμορφωμένο (συνεχής γραμμή) πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 (χρησιμοποιώντας ως πρότυπο το μισό συμμετρικό του δοκιμίου). Η γραμμική ελαστική, αλλά μη-γραμμική συμπεριφορά μεμβράνης, προσομοιώθηκε με ένα μάλλον χαμηλό φορτίο λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων που αναπτύσσεται στην γωνία-εγκοπή όπου αρχίζει η έναρξη σχισίματος (Σχήματα 5 και 6) και των σχετικών προβλημάτων σύγκλισης που προέκυψαν σε υψηλότερα φορτία. Για την αποφυγή προβλημάτων σχετικών με σημεία ανωμαλίας η γωνία προσομοιώθηκε με καμπύλη μικρής ακτίνας. Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι η αριθμητική μη-γραμμική συμπεριφορά μεμβράνης που οδηγεί σε συγκλίνουσα λύση είναι το αποτέλεσμα του ιδιαίτερου σχήματος του δοκιμίου σε συνδυασμό με την δράση μεμβράνης. Είναι η δράση μεμβράνης που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων (οι οποίες θα συνεισέφεραν στην ανάπτυξη επίπεδων ροπών κάμψης για λόγους στατικής ισορροπίας), και είναι το σχήμα του δοκιμίου που οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις. Αυτή η μη-γραμμική συμπεριφορά προσομοιώνει ικανοποιητικά την αντίστοιχη συμπεριφορά που παρατηρείται στο εργαστήριο κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης της δοκιμής (γραμμική ελαστική συμπεριφορά πριν την έναρξη τοπικής διαρροής του υλικού και την έναρξη σχισίματος). Να σημειωθεί ότι

εκτός από την συγκέντρωση τάσεων με διεύθυνση κατά μήκος του δοκιμίου (Σχήμα 5) υπάρχουν επίσης συγκεντρώσεις τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση καθώς και διατμητικών τάσεων στην ίδια περιοχή της εγκοπής. Θα πρέπει να τονισθεί ότι ο σκοπός αυτής της εργασίας δεν είναι η προσομοίωση της έναρξης και διάδοσης σχισίματος αλλά μάλλον να επιβεβαιώσει την γραμμική ελαστική δράση μεμβράνης του προτύπου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς φύλλων πολυαιθυλενίου LDPE που περιγράφεται στην παρούσα εργασία αποτελεί το πρώτο βήμα για την ανάλυση της εντατικής κατάστασης φύλλων πολυαιθυλενίου για θερμοκήπια κάτω από διάφορες συνθήκες φόρτισης. Συγκεκριμένα, τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί θα εφαρμοστούν στη συνέχεια για την μελέτη των μηχανισμών ανάληψης και αναδιανομής φορτίων που αναπτύσσονται από τα φύλλα πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων για να μεταφέρουν εξωτερικά φορτία όπως ανεμοπίεση και χιόνι στον φέροντα οργανισμό. Ο τελικός στόχος αυτής της έρευνας είναι η ετοιμασία τεχνικών οδηγιών για τον αξιόπιστο σχεδιασμό θερμοκηπίων με κάλυψη από φύλλα πολυαιθυλενίου LDPE ο οποίος θα κάνει αποδοτική αξιοποίηση των φύλλων πολυαιθυλενίου LDPE για θερμοκήπια.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Briassoulis, D.; Waaijenberg, D.; Gratraud, J. and von Elsner B. 1997 (a). Mechanical properties of covering materials for greenhouses. Part 1: General Overview. *J. Agric. Engng. Res.*, 67, 81-96.
2. Osswald, T. A. and Menges, G. 1996. *Material Science of Polymers for Engineers*. Hanser/ Gardner Publications, Inc. Cincinnati.
3. Grulke, E. A. 1994. *Polymer Process Engineering*. PTR Prentice Hall.
4. Mills, N. J. 1993. *Plastics: Microstructure & Engineering Applications*. 2 Rev. ed. Edward Arnold, G.B.
5. Segmoar, R. B. 1982. *Plastics vs corrosive*. J. Wiley & Sons.
6. Whelam, T. and Goff, J. 1950. *Injection molding of thermoplastic materials*. Reinhold P.C., New York.
7. Billmeyer, F. W. 1984. *Textbook of Polymer Science*. Willey Interscience Publication.
8. Briassoulis, D.; Waaijenberg, D.; Gratraud, J. and von Elsner B. 1997 (b) Mechanical properties of covering materials for greenhouses. Part 2: Quality Assessment. *J. Agric. Engng. Res.*, 67, 171-217.
9. Courtney, T. H. 1990. *Mechanical behaviour of materials*. McGraw-Hill.
10. Ogorkiewicz, R. M. 1977. The engineering properties of plastics *Engineering Design Guides 17*, Design Council, Oxford University Press.
11. Shah, V. 1984. *Handbook of Plastics: Testing Technology*. J. Wiley & Sons.
12. Simonds, H. R. 1961. *Source book of the new plastics*. Reinhold Publishing Corporation, New York.
13. Dilara P.A. and Briassoulis D. 1998. Standard testing methods for mechanical properties and degradation of Low Density Polyethylene (LDPE) films used as greenhouse covering materials: a critical evaluation. *Polymer Testing*, 17, 549-585.
14. Dilara P.A., Briassoulis D., Degradation and Stabilisation of Low Density Polyethylene (LDPE) Films Used as Greenhouse Covering Materials, *to be published in Jour. of Agricultural Engineering Research*.
15. Dowling N. E. 1993. *Mechanical behavior of materials*. Prentice-Hall International Editions.
16. ASTM D 882. 1991. Standard test methods for tensile properties of thin plastic sheeting.
17. ISO/R 1184 Plastics - Determination of tensile properties of films.
18. Briassoulis, D. Aristopoulou, A., Vitali, M. Adaptation and Harmonisation of Standard Testing Methods for Mechanical Properties of Low Density Polyethylene (LDPE) Films. *Proceedings AgEng 2000 Conference*, Warwick, UK.
19. ASTM-D 1004. 1990. Standard test method for initial tear resistance of plastic film and sheeting.
20. ISO 34-1. 1994. Rubber, vulcanised or thermoplastics - Determination of tear strength - Part 1 - Trouser, angle and crescent test pieces.
21. ANSYS 1999. v. 5.5, ANSYS Inc., Canonsburg, USA.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Μπαρτζάνας Θ¹., Fatnassi Η²., Φεΐδαρος Δ³., Βλάχος Ν³., Κίττας Κ¹

¹ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωϊκής Παραγωγής, Εργ.Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος, Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

² Universite Ibn Zohr Faculte Des Sciences, Laboratoire de Thermodynamique Mitallurgique et Rhologie des Matriaux Agadir -Maroc

³ Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

Περίληψη

Στην εργασία αυτή επιχειρείται η προσομοίωση της ροής του φυσικού αερισμού θερμοκηπίων για διάφορους τύπους ανοιγμάτων με την βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με τον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CFD2000. Οι οριακές συνθήκες όπως η θερμοκρασία των τοιχωμάτων, του καλύμματος, της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου λαμβάνονται από πειραματικές μετρήσεις. Ανάλογα με την γεωμετρία του μοντέλου εφαρμόζεται διδιάστατη ή τρισδιάστατη μοντελοποίηση ανάλογα με την γεωμετρία θερμοκηπίου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η καλλιέργεια. Τα αποτελέσματα δείχνουν την επίδραση των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού στην εσωτερική ροή του αέρα εντός του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά που αναφέρονται στην σχετική βιβλιογραφία και μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτίωση του σχεδιασμού των ανοιγμάτων αερισμού του θερμοκηπίου.

SIMULATION OF GREENHOUSE NATURAL VENTILATION

Bartzanas Th¹., Fatnassi Η²., Feidaros D³., Vlahos N³., Kittas C¹

¹University of Thessaly, School of Agriculture, Crop & Animal Production

²Universite Ibn Zohr Faculte Des Sciences, Laboratoire de Thermodynamique Mitallurgique et Rhologie des Matriaux Agadir -Maroc

³University of Thessaly, School of Mechanical and Industrial Engineering, Fluid Mechanics & Turbomachinery Lab.

Abstract

A CFD analysis was conducted focussing on the natural ventilation processes into a greenhouse. It was examined various openings of two main greenhouse types (tunnel and span) which are the most widespread types in Greece. The simulations were performed with the commercial code CFD2000. The turbulence influence was approached by the two-equations k-ε model. For the definition of the boundary conditions was used data,

coming from experimental measurements. In the case, where the ventilations openings were set along of the greenhouse, the corresponding simulations were performed in two dimensions. The simulations were conducted within various wind seep with absence of crop. The results could be used to optimize the design of the greenhouse openings in order to improve the air flow into it.

Εισαγωγή

Ο φυσικός αερισμός είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύθμισης του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Η ροή αέρα, όπως αυτή δημιουργείται από την διαφορά πιέσεων στα ανοίγματα αερισμού ή λόγω φαινομένων άνωσης, ρυθμίζει τα επίπεδα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκεντρώσεως CO₂ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο ρόλος του φυσικού αερισμού είναι ιδιαίτερα κρίσιμος σε θερμοκήπια τα οποία δεν διαθέτουν εναλλακτικούς τρόπους εξαερισμού. Στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες, οι ανάγκες για εξαερισμό είναι μεγάλες από νωρίς την άνοιξη έως αργά το φθινόπωρο. Τα περισσότερα ελληνικά θερμοκήπια χρησιμοποιούν μόνο ανοίγματα φυσικού αερισμού, αφού ελάχιστα είναι αυτά τα οποία διαθέτουν συστήματα δυναμικού αερισμού. Επομένως ο σωστός σχεδιασμός αλλά τοποθέτηση των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού είναι ιδιαίτερα κρίσιμος στις περιοχές αυτές, αφού είναι και ο μοναδικός τρόπος αποφυγής των υπερθερμάνσεων.

Μέχρι πρόσφατα η μελέτη και μοντελοποίηση του φυσικού αερισμού στηριζόταν στην μέθοδο του αέριου δείκτη. Η πρόσφατη πρόοδος στην μοντελοποίηση των ροών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με την βοήθεια αριθμητικών μεθόδων (CFD) καθώς και με την χρήση τρισδιάστατων ηχητικών ανεμομέτρων, (Wang 1998, Boulard, 2000) επέτρεψε την καλύτερη διερεύνηση του μηχανισμού του φυσικού αερισμού. Η πρώτη προσπάθεια μελέτης του φυσικού αερισμού σε θερμοκήπια, με τη χρήση κώδικα CFD έγινε από τους Okushima et al (1989). Οι περιορισμένες δυνατότητες των τότε υπολογιστών και κυρίως η αδυναμία περιγραφής με ακρίβεια του αριθμητικού πλέγματος δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε συγκρίσεις που επιχειρήθηκαν με τα αποτελέσματα του Sase et al (1984) τα οποία εξέταζαν την ροή αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο τοποθετημένο σε αεροσήραγγα. Ο Mistriotis (Mistriotis et al, 1977 a, b) μελέτησε την ροή αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας σε φυσικά αεριζόμενα θερμοκήπια, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Τα αποτελέσματα του έδειξαν να συμφωνούν με ανάλογα πειραματικά που έγιναν είτε σε αεροσήραγγα (Sase et al, 1984) είτε σε πραγματικές διαστάσεις με την χρήση τρισδιάστατων ηχητικών ανεμομέτρων (Boulard et al, 1997). Σημαντική προσπάθεια μοντελοποίησης και χαρακτηρισμού του φυσικού αερισμού σε θερμοκήπια έγινε και από τους Boulard, (Boulard et al, 1999, 2000), Haxaire (1999) στον σταθμό βιοκλιματολογίας του Ινστιτούτου Αγρονομικών Ερευνών της Γαλλίας (INRA). Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονταν με αντίστοιχα πειραματικά που γινόταν είτε σε μικρής κλίμακας θερμοκήπια είτε με χρήση τρισδιάστατων ηχητικών ανεμομέτρων και αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας γρήγορης απόκρισης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD2000), με αλγόριθμο επίλυσης τον PISO (Issa, 1985), με σκοπό την διερεύνηση του φυσικού αερισμού των θερμοκηπίων. Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται, λόγω του περιορισμένου χώρου, περιπτώσεις τούνελ θερμοκηπίου με διαφορετικά ανοίγματα αερισμού και ταχύτητα εξωτερικού αέρα κάθετη σε αυτά.

Μαθηματικό μοντέλο

Όπως είναι γνωστό ο φυσικός αερισμός προκαλείται λόγω της διαφοράς πιέσεων στα ανοίγματα αερισμού εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου, είτε λόγω διαφορών στην πυκνότητα του εσωτερικού αέρα αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών. Η εξίσωση του Bernoulli, η οποία ευρέως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού σε θερμοκήπια δεν επιτρέπει την διερεύνηση της ετερογένειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Για να γίνει δυνατή η διερεύνηση των διαφορετικών πεδίων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη η επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς. Οι εξισώσεις αυτές δίνουν μια αναπαράσταση στον χώρο και τον χρόνο των διαφόρων εξαρτημένων μεταβλητών. Οι εξισώσεις αυτές λόγω της μη γραμμικότητας τους δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Προσεγγίζονται όμως υπολογιστικά με την βοήθεια αριθμητικών μεθόδων.

Η αριθμητική μέθοδος επιτρέπει τον υπολογισμό του πεδίου ταχύτητας μιας ροής λύνοντας αλγεβρικά τις αντίστοιχες εξισώσεις μεταφοράς. Η εξίσωση που περιγράφει τα φαινόμενα μεταφοράς στις τρεις διαστάσεις έχει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial(U\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \Phi + S_{\Phi} \quad (1)$$

όπου U , V , W είναι οι μέσες χρονικές ταχύτητες, Φ η εξαρτημένη μεταβλητή η οποία απεικονίζει τα διάφορα μέσα μεγέθη, όπως τρεις συνιστώσες ταχύτητας, ενθαλπία, κινητική ενέργεια της τύρβης κ.τ.λ., Γ είναι ο συντελεστής μεταφοράς και S_{Φ} ο πηγαίος όρος.

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται πάνω σε ένα διακριτό σύνολο σημείων που περιγράφει τον χώρο. Η προσομοίωση στην παρούσα εργασία γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume). Η επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη ροή, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, και η θερμοκρασία, ενσωματώνονται στις αντίστοιχες οριακές συνθήκες.

Τα ρευστοδυναμικά πεδία εκφράζονται στην γενικότητα τους από τις εξισώσεις Navier-Stokes ή στην περίπτωση του μη συνεκτικού ρευστού, από τις εξισώσεις Euler. Και στις δύο περιπτώσεις το πεδίο ροής εκφράζεται από ένα σύστημα μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μη γραμμικότητα των εξισώσεων οφείλεται στην χωρική επιτάχυνση του ρευστού και αποτελεί την βασική αιτία της δυσκολίας επίλυσης των. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας της αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων είναι η μετατροπή τους σε αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες όταν επιλυθούν με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή δίνουν αριθμητικά τις τιμές των ταχυτήτων ή των άλλων βαθμωτών μεγεθών στις διακριτές θέσεις του υπολογιστικού πεδίου. Το σχήμα διακριτοποίησης των εξισώσεων, που χρησιμοποιήθηκε, βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Finite Volumes, Patankar 1980).

Στις περιπτώσεις τυρβώδους ροής όπου εμφανίζονται δυναμικά φαινόμενα σε κλίμακα μικρότερη από την κλίμακα του δικτύωματος επίλυσης, η παραπάνω μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν μοντέλα της τυρβώδους ροής ώστε να αντιμετωπίζεται η πολυπλοκότητα της τυρβώδους δυναμικής. Στα μοντέλα αυτά τα μεγέθη που εκφράζουν την ροή περιγράφονται ως αθροίσματα δύο συνιστωσών δηλαδή ενός αργά μεταβαλλομένου και ενός γρήγορα μεταβαλλομένου μέρους βασιζόμενα στον επιμερισμό Reynolds κατά τον οποίον η στιγμιαία μεταβολή

μίας βαθμωτής μεταβλητής (π.χ της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του αέρα) της ροής επιμερίζεται ως εξής:

$$U = \bar{U} + u' \quad (2)$$

όπου, \bar{U} είναι η μέση χρονική τιμή της μεταβλητής και u' η απόκλιση από την μέση τιμή. Η μοντελοποίηση της τύρβης γίνεται από το μοντέλο δύο εξισώσεων k-ε (Launder and Spalding 1974), αξιοποιώντας στον μέγιστο δυνατό βαθμό τις μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις που παρουσιάζει. Στο μοντέλο αυτό η τυρβώδης δυναμική περιγράφεται από δύο επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς που είναι συζευγμένες με τις εξισώσεις που περιγράφουν την ροή (Navier-Stokes). Οι δύο αυτές εξισώσεις εκφράζουν την διατήρηση δύο φαινομενολογικών ποσοτήτων, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k, και του ρυθμού απόσβεσης του ε (dissipation rate). Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν απαιτεί τον ορισμό επιπλέον εμπειρικών παραμέτρων. Έτσι είναι δυνατόν να επιλυθούν πολύπλοκες ροές που αντιμετωπίζονται σε ελλειπτικά προβλήματα. Οι όροι της επίδρασης και της σκέδασης της τύρβης μοντελοποιούνται μαζί σε μια ενιαία μεταβλητή (turbulent viscosity).

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

όπου C_μ είναι αδιάστατη σταθερά, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού ενώ k και ε είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και ο ρυθμός σκέδασης της αντίστοιχα. Οι σχετικές εξισώσεις για τις μεταβλητές αυτές είναι αντίστοιχα:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t G - \rho \varepsilon + S_{k,p} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \varepsilon) + S_{\varepsilon,p} \quad (5)$$

όπου C_1 και C_2 είναι αδιάστατες σταθερές ενώ με τον όρο G εκφράζεται ο ρυθμός παραγωγής κινητικής ενέργειας ο οποίος είναι

$$G = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\frac{\rho k}{\mu_t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (6)$$

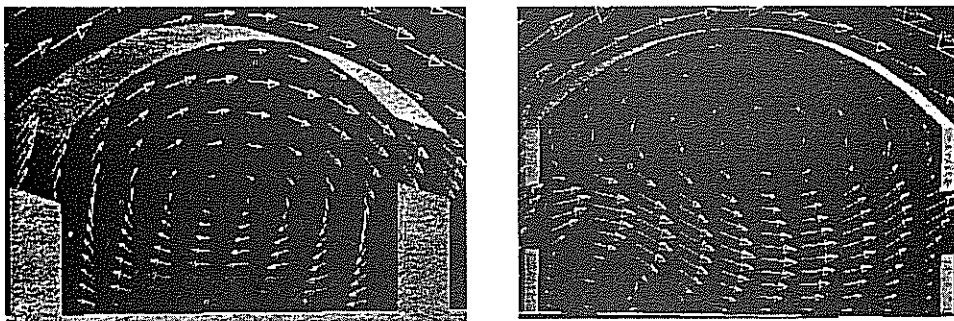
Τιμές για τις αδιάστατες σταθερές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες εξισώσεις, όπως δίνονται από το CFD2000 είναι: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $Pr_k = 1.0$ και $Pr_\varepsilon = 1.3$ (standard k-ε model).

Οριακές συνθήκες

Τα όρια του υπολογιστικού πεδίου ήταν μεγαλύτερα από τις διαστάσεις του θερμοκηπίου σε κάθε περίπτωση. Χρησιμοποιήθηκε ανομοιόμορφο αριθμητικό πλέγμα με πολλά κελιά συγκεντρωμένα κοντά στα τοιχώματα του θερμοκηπίου. Η συναγωγή στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ήταν αποτέλεσμα είτε του εξωτερικού αέρα είτε των θερμοκρασιακών διαφορών (υπόθεση Boussinesq) ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση. Οι πλευρές του θερμοκηπίου θεωρήθηκαν αδιαβατικές ενώ η οροφή και το έδαφος του θερμοκηπίου προσομοιώθηκαν ως επιφάνειες σταθερής θερμοροής, αφού τόσο η οροφή όσο και το έδαφος απορροφούν ένα μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και το επανεκπέμπουν με την μορφή αισθητής θερμότητας. Από μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (ολικής και καθαρής) τόσο μέσα στο θερμοκήπιο όσο και έξω από αυτό είναι δυνατόν να υπολογιστεί, τόσο η ενέργεια που απορροφά το υλικό κάλυψης της οροφής του θερμοκηπίου όσο και το έδαφος του. Στις προσομοιώσεις η διεύθυνση της ταχύτητας του αέρα ήταν είτε κάθετη, είτε παράλληλη, είτε σχημάτιζε γωνία 45° με τα ανοίγματα αερισμού. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια αναφέρονται σε ταχύτητα κάθετη στα ανοίγματα αερισμού και με μέτρο 2m/sec . Η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν 27°C και σε όλες τις περιπτώσεις η ροή θερμότητας από το έδαφος ήταν μεγαλύτερη από αυτές στην οροφή του θερμοκηπίου.

Αποτελέσματα.

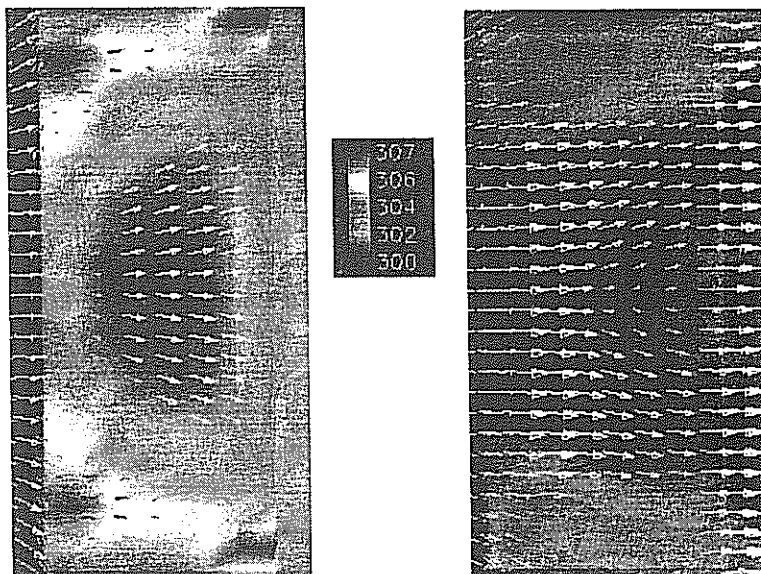
Η εικόνα 1 παρουσιάζει τα διανύσματα ταχύτητας του αέρα σε τούνελ θερμοκηπίου για δύο διαφορετικούς τύπους ανοιγμάτων. Στην πρώτη περίπτωση τα ανοίγματα ξεκινούν από την θέση του ορθοστάτη του θερμοκηπίου, ενώ στην δεύτερη περίπτωση τα ανοίγματα είναι τοποθετημένα στα μέσα των πλευρών του θερμοκηπίου. Στην πρώτη περίπτωση το εισερχόμενο ρεύμα του αέρα οδηγείται στην οροφή του θερμοκηπίου και διαγράφοντας κυκλική πορεία, εξέρχεται από το απέναντι άνοιγμα. Στην δεύτερη περίπτωση το κύριο ρεύμα του αέρα διασχίζει το χώρο του θερμοκηπίου εισερχόμενο από το προσήνεμο άνοιγμα αερισμού και εξέρχεται από το απέναντι, με μια μικρή ανακυκλοφορία του αέρα στην οροφή του θερμοκηπίου.



Εικόνα 1. Διανύσματα ταχύτητας του αέρα του αέρα σε τούνελ θερμοκηπίου με διαφορετικά ανοίγματα αερισμού.

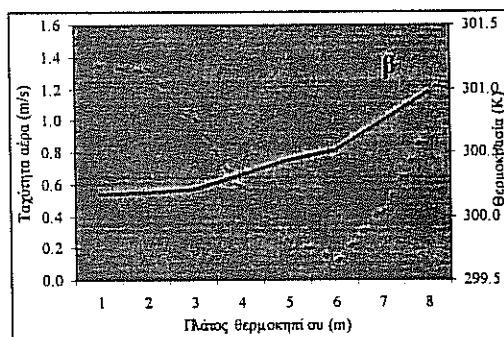
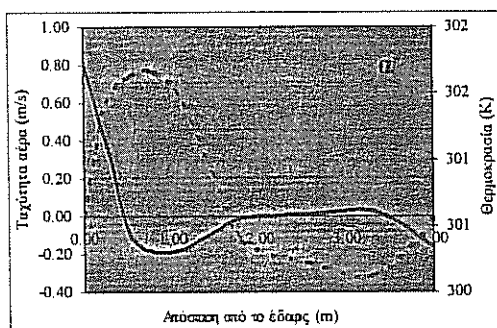
Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται η κατανομή της θερμοκρασίας και τα διανύσματα ταχύτητας του αέρα για τον δεύτερο τύπο θερμοκηπίου, σε δύο οριζόντια επίπεδα, το πρώτο σε απόσταση 0.5m από το έδαφος και το δεύτερο σε απόσταση 1.5m από το έδαφος (στο μέσο των ανοιγμάτων αερισμού). Στην εικόνα αυτή φαίνεται η

ετερογένεια του θερμοκηπιακού μικροκλίματος, που αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας, αφού τα άκρα του θερμοκηπίου εμφανίζονται σαφώς θερμότερα. Ακόμη και στο επίπεδο των ανοιγμάτων αερισμού, όπου η ταχύτητα του αέρα είναι μεγαλύτερη, τα δύο άκρα του θερμοκηπίου είναι αρκετά θερμότερα από την μέση τιμή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.



Εικόνα 2. Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου και διανυσμάτων ταχύτητας του αέρα σε δύο οριζόντια επίπεδα 0.5m 1.3m. από το έδαφος, αντίστοιχα.

Οι κατανομές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου φαίνονται στα δύο γραφήματα που ακολουθούν (Γράφημα 1α και 1β), και τα οποία παρουσιάζουν τις κατανομές τόσο στην κάθετη τομή στο μέσο του θερμοκηπίου (1α) όσο και κατά πλάτος του θερμοκηπίου στο μέσο του ανοίγματος αερισμού.



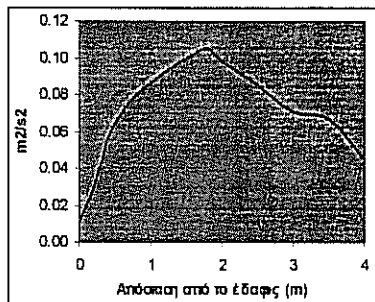
Γράφημα 1(α και β). Κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα σε κάθετο (α) και οριζόντιο πλάνο (β) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. (Θερμοκρασία —, ταχύτητα αέρα - - - - -)

Από τα δύο γραφήματα φαίνεται πως η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται από το έδαφος προς την οροφή του θερμοκηπίου, στην συνέχεια παραμένει αμετάβλητη κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, για να μειωθεί στην συνέχεια και πάλι κοντά στην οροφή του θερμοκηπίου (Γράφημα 1α). Στο οριζόντιο επίπεδο το υπήνεμο τμήμα του θερμοκηπίου εμφανίζεται θερμότερο από το προσήνεμο κατά 1 βαθμό (Γράφημα 1β). Η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη σε άλλα ύψη του θερμοκηπίου χωρίς πάντως να ξεπερνάει ποτέ τους 2.5 βαθμούς.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι ιδιαίτερα αυξημένη κοντά στα ανοίγματα αερισμού ενώ η τιμή της μειώνεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (εικόνα 3). Στη κάθετη τομή, η τιμή της (k) απόκτά μια κορυφή στο κέντρο του θερμοκηπίου, όπου και η ταχύτητα του αέρα έχει τις μέγιστες τιμές της (Γράφημα 2), την ακριβώς πορεία ακολουθεί και ο ρυθμός σκέδασης της κινητικής ενέργειας.



Εικόνα 3. Τυρβώδης κινητική ενέργεια σε οριζόντιο πλάνο στο μέσο των ανοιγμάτων



Γράφημα 2. Τυρβώδης κινητική ενέργεια (m^2/s^2) σε κάθετο πλάνο στο μέσο του θερμοκηπίου

Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε η διερεύνηση του φυσικού αερισμού των θερμοκηπίων με υπολογιστικές μεθόδους (CFD). Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται φαίνεται η επίδραση των ανοιγμάτων στην ροή του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όπου εμφανίζεται πάντα μια διαβάθμιση της θερμοκρασίας από το υπήνεμο προς το προσήνεμο τμήμα του θερμοκηπίου. Η ίδια ετερογένεια στην κατανομή της θερμοκρασίας παρατηρείται και στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις, εμφανίζοντας τα άκρα του θερμοκηπίου πάντα θερμότερα. Η ετερογένεια στην κατανομή της θερμοκρασίας απόκτά στοιχεία χαρακτηριστικού δείκτη για τον προσδιορισμό της ποιότητας της ροής αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Έτσι ο αέρας εμφανίζεται να είναι ψυχρός και ιδιαίτερα τυρβώδης κατά την είσοδο του στο προσήνεμο άνοιγμα και πιο θερμός, βραδύτερος και λιγότερο τυρβώδης κατά την έξοδο

του από το θερμοκήπιο. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι ιδιαίτερα έντονη στο ύψος των ανοιγμάτων αερισμού ενώ η τιμή της μειώνεται στο εσωτερικό και σε περιοχές κοντά στην οροφή και στο έδαφος του θερμοκηπίου, όπου παρατηρούνται και μικρότερες ταχύτητες. Η προσθήκη της καλλιέργειας καθώς και η μοντελοποίηση του μηχανολογικού εξοπλισμού του θερμοκηπίου (συστήματα θέρμανσης-δυναμικού αερισμού) θα δώσουν μια πιο πλήρη εικόνα των διαφόρων ροών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Βιβλιογραφία

- Boulard T., Papadakis G., Kittas C., Mermier M., 1997.** Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 88:111-119.
- Boulard T., Haxaire R., Lamrani M.A., Roy J.C., 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
- Boulard T., Wang S., Haxaire R., 2000.** Mean and turbulent air flows and microclimate patterns in an empty greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology* 100:169-181
- CFD2000/STORM ver3.0, 1998.** Computational fluid dynamics systems. Pacific Sierra Corp., USA.
- Haxaire R.1999.** Carcterisation et modelisation des ecoulements d'air dans une serre. Ph.D Thesis, 149p.
- Issa R.I., 1985.** Solution of the implicity discretised fluid flow equations by operator. *Journal of Computational Physics*, 62: 40-54.
- Lauder B.E and Spaiding D.B, 1974.** The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Methods in Appl. Mech &Engng.* 3,269
- Mistriotis A., Arcidiano C., Picuno P., Bot G.A., Scarascia Mugnozza G. 1997a.** Computanional analysis of the natural ventilation in greenhouses at low wind speed. *Agricultural and Forest Meteorology* 88:121-135
- Mistriotis A., Bot G.A., Picuno P., Scarascia Mugnozza G. 1997b** Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation with computanional fluid dynamics *Agricultural and Forest Meteorology* 85: 317-328
- Okushima, L. et al, 1989.** A support system for natural ventilation desigb of greenhouses based on computational aerodynamics. *Acta Horticulturae* 248, 129-136
- Patankar S.V 1980.** Numerical Heat Trabsfer. Hemisphere.
- Sase S., Takakura T. and Nara M., 1984.** Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae* 148, 329-337
- Wang S., 1998.** Measurement and modelling of natural ventilation in a large venlo-type greenhouse. Ph.D Thesis 193pp.

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Φ. Ν. Κουμπουλής* , **Μ. Γ. Σκαρπέτης***,
Π. Γιαγλάρας και Κ. Κίττας****

*Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανία,
Πεδίον Αρεως Βόλος, Ελλάδα,
e-mails: fkoumb@mie.uth.gr, miskarpe@mie.uth.gr

**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Πεδίον
Αρεως, Βόλος, Ελλάδα, e-mail: ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Χρησιμοποιώντας ένα προσεγγιστικό μοντέλο για την περιγραφή της συσχέτισης της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου με τον θερμαντήρα προτείνεται η τεχνική ελέγχου του ταυριάσματος σε μοντέλο. Σχεδιάζεται ο ελεγκτής που αντιστοιχεί στην παραπάνω σχεδιαστική απαίτηση. Αναπτύσσεται αλγόριθμος σε περιβάλλον μικροελεγκτή. Ο αλγόριθμος υλοποιείται σε μικροελεγκτή 80C196KC. Αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα των πολύθυρων μικροελεγκτών.

MICROCONTROLLER IMPLEMENTATION OF A TEMPERATURE CONTROLLER FOR A GREENHOUSE

F. N. Koumboulis* , **M. G. Skarpetis***,
P. Giaglaras and K. Kittas****

*Department of Mech. and Ind. Eng., University of Thessaly,
383 34 Pedion Areos, Volos, GREECE.
e-mails: fkoumb@mie.uth.gr , miskarpe@mie.uth.gr

**School of Agriculture, Crop & Animal Production, University of Thessaly,
383 34 Pedion Areos, Volos, GREECE, e-mail: ckittas@uth.gr

ABSTRACT

Using an approximating model, describing the relation between the temperature of a greenhouse and the respective heating system, the approach of exact model matching is proposed. The dynamic controller solving the problem is determined. The program implementing the controller in a 80196KC microcontroller is developed. Several remarks regarding the characteristics and advantages of multi-port microcontrollers are presented.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα του ελέγχου της θερμοκρασίας σε θερμοκήπια αποτελεί ένα από τα πιο συνήθη προβλήματα ελέγχου σε γεωργικές εφαρμογές (βλ. π. χ. [1-8]). Το πρόβλημα του ελέγχου σε τέτοια συστήματα εντάσσεται στα πλαίσια της βελτίωσης του εξοπλισμού του θερμοκηπίου (βλ. [16]) και ειδικότερα στην εφαρμογή κατάλληλου υλικού και λογισμικού. Ένδεικτικά σχολιάζονται μερικές χαρακτηριστικές εργασίες. Οι εργασίες [5] και [6] προτείνουν λογικούς ελεγκτές οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υπολογιστική απλότητα αλλά παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα ότι δεν εγγυώνται σύγκλιση του αποτελέσματος στην επιθυμητή τιμή καθώς ακόμη ότι απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για την αντιστάθμιση των σφαλμάτων. Οι εργασίες [7] και [8] στηρίζονται σε προσεγγιστικά μοντέλα (βλ. [7]) και πειραματικά μοντέλα (ταυτοποίηση) (βλ.[8]) και προτείνουν δυναμικούς ελεγκτές ειδικού τύπου (PI). Οι εργασίες [7] και [8] χαρακτηρίζονται από βραχυχρόνια αντιστάθμιση αλλά η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου μοιάζει να είναι μεγάλη. Το υλικό στο οποίο υλοποιούνται οι συνήθεις ελεγκτές θερμοκηπίου είναι αναλογικά κυκλώματα, προσωπικοί υπολογιστές, PLCs, και μικρουπολογιστές.

Στην εργασία αυτή το πρόβλημα μελετάται χρησιμοποιώντας ένα προσεγγιστικό μοντέλο και την τεχνική του ακριβούς ταιριάσματος σε μοντέλο. Σχεδιάζεται και προσδιορίζεται ο δυναμικός ελεγκτής που επιλύει το πρόβλημα. Αναπτύσσεται πρόγραμμα σε μικροελεγκτή για την υλοποίηση του ελεγκτή.

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας συνοψίζεται α) στην εφαρμογή γενικού δυναμικού ελεγκτή, β) στην χρήση ειδικής υπολογιστικής πλατφόρμας (μικρουπολογιστής) η οποία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα.

2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Το ακόλουθο προσεγγιστικό μοντέλο περιγράφει τη σχέση της θερμοκρασίας ενός θερμοκηπίου με τις μεταβολές μίας τρίδρομης βαλβίδας που μεταβάλλει την παροχή ζεστού νερού το οποίο κατευθύνεται σε εναλλάκτες θερμότητας με τον αέρα [4]

$$Y(s) = \frac{e^{-s\tau}}{\alpha s + \kappa} U(s) \quad (2.1)$$

όπου $Y(s)$ είναι ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας της μεταβολής της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο σε σχέση με μία στάθμη αναφοράς και $U(s)$ είναι ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας της μεταβολής της βαλβίδας. Ο συντελεστής κ αντιστοιχεί σε απώλειες θερμότητας, ο συντελεστής α αντιστοιχεί στη θερμική χωρητικότητα, ενώ η χρονική καθυστέρηση τ αντιστοιχεί στον χρόνο που απαιτείται για την απόδοση της θερμότητας που ενεργοποιεί η βαλβίδα.

Χρησιμοποιώντας βασικούς προσεγγιστικούς τύπους για την καθυστέρηση [9], το μοντέλο (2.1) προσεγγίζεται από το ακόλουθο μοντέλο δευτέρας τάξεως

$$Y(s) = (e^{-\tau\kappa/\alpha}) \left(\frac{1}{\alpha s + \kappa} - \frac{2\alpha^{-1}}{s + \tau/2} \right) U(s) \quad (2.2)$$

Η καλή λειτουργία του συστήματος εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι η καθυστέρηση είναι αρκετά μικρή και ειδικότερα ότι $\tau < \frac{\alpha}{\kappa}$.

Η ακριβής διακριτοποίηση (βλ. π.χ.[10]) του συστήματος (2.2) είναι

$$Y(z) = (\alpha^{-1} e^{\tau\kappa/\alpha}) \left(\frac{\alpha\kappa^{-1} - \alpha\kappa^{-1} e^{-\kappa T/\alpha}}{z - e^{-T\kappa/\alpha}} + \frac{-\tau + (\tau/2)e^{-2T/\tau}}{z - e^{-2T/\tau}} \right) U(z) \quad (2.3)$$

όπου $Y(z)$ είναι ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας της δειγματοληψίας της μεταβολής της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο σε σχέση με μία στάθμη αναφοράς και $U(z)$ είναι ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας της δειγματοληψίας της μεταβολής της βαλβίδας. Η μεταβλητή z είναι μιγαδική μεταβλητή που δηλώνει τη συχνότητα. Ο χρόνος T δηλώνει την περίοδο δειγματοληψίας. Η περιγραφή (2.3) γράφεται πιο συμπαγώς ως εξής

$$Y(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z^2 + a_1 z + a_2} U(z) \quad (2.4)$$

όπου

$$\begin{aligned} a_1 &= -e^{-\kappa T/\alpha} - e^{-2T/\tau}, \quad a_2 = e^{-(\kappa T/\alpha) - (2T/\tau)} \\ b_0 &= \alpha^{-1} e^{\kappa T/\alpha} \left[\alpha \kappa^{-1} (1 - e^{-\kappa T/\alpha}) + \frac{1}{2} \tau (-2 + e^{-2T/\tau}) \right] \\ b_1 &= \alpha^{-1} e^{\kappa T/\alpha} \left[-\alpha \kappa^{-1} e^{-2T/\tau} (1 - e^{-\kappa T/\alpha}) - \frac{1}{2} \tau e^{-\kappa T/\alpha} (-2 + e^{-2T/\tau}) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

3. ΑΚΡΙΒΕΣ ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το επιθυμητό μοντέλο για το συγκεκριμένο σύστημα επιλέγεται να είναι

$$H_M(z) = \frac{(b_0 z + b_1)(b_0 + b_1)^{-1}}{z^3} \quad (3.1)$$

Σημειώνεται ότι το παραπάνω μοντέλο συνδυάζει βέλτιστη θέση των πόλων με γρήγορη απόκριση και γρήγορη και αξιόπιστη ακολούθηση σταθερής εντολής.

Χρησιμοποιώντας την τεχνική του τέλειου ταιριάσματος σε μοντέλο με ελεγκτές πεπερασμένης ακρίβειας [10] προτείνεται ο ακόλουθος ελεγκτής πρώτης τάξεως

$$U(z) = -\frac{f_0 z + f_1}{z + c_1} Y(z) + \frac{g_0 z + g_1}{z + c_1} \Omega(z) \quad (3.2)$$

όπου $\Omega(z) = Z\{\omega(k)\}$ είναι ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας της εξωτερικής εξόδου. Η εξωτερική είσοδος αντιπροσωπεύει την επιθυμητή τιμή της εξόδου του συστήματος. Το πρόβλημα του ακριβούς ταιριάσματος στο μοντέλο (3.1) με δυναμικό ελεγκτή της μορφής (3.2) επιλύεται με τις ακόλουθες επιλογές των παραμέτρων του ελεγκτή

$$\begin{aligned} c_1 &= \{2\alpha(e^{\kappa T/\alpha} - 1)[2\alpha e^{\kappa T/\alpha} - (e^{2T/\tau} + e^{\kappa T/\alpha})(2e^{2T/\tau} - 1)\kappa\tau\} + \\ &\quad + e^{2T/\tau}(1 - 2e^{2T/\tau})^2 \kappa^2 \tau^2 \left\{ 2\alpha(e^{\kappa T/\alpha} - 1)(e^{2T/\tau} - e^{\kappa T/\alpha})^2 (2e^{2T/\tau} - 1)\kappa\tau \right\}^{-1} \\ f_0 &= -e^{-\kappa T/\alpha} \left\{ 2\alpha e^{2\kappa T/\alpha} (e^{\kappa T/\alpha} - 1) + e^{4T/\tau} (1 - 2e^{2T/\tau})\kappa\tau \right\} \times \\ &\quad \times \left\{ (e^{\kappa T/\alpha} - 1)(e^{2T/\tau} - e^{\kappa T/\alpha})^2 (2e^{2T/\tau} - 1)\tau \right\}^{-1} \\ f_1 &= e^{-\kappa T/\alpha} \left\{ 2\alpha e^{2\kappa T/\alpha} (e^{\kappa T/\alpha} - 1) + e^{2T/\tau} (1 - 2e^{2T/\tau})\kappa\tau \right\} \times \\ &\quad \times \left\{ (e^{\kappa T/\alpha} - 1)(e^{2T/\tau} - e^{\kappa T/\alpha})^2 (2e^{2T/\tau} - 1)\tau \right\}^{-1} \\ g_0 &= 0 \\ g_1 &= 2\alpha e^{[\kappa(T-\tau)/\alpha] + (2T/\tau)} \left\{ (e^{\kappa T/\alpha} - 1) \left[2\alpha(e^{2T/\tau} - 1) - (2e^{2T/\tau} - 1)\kappa\tau \right] \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (3.3)$$

4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επίδραση του ήλιου και των σύννεφων στη θερμοκρασία του θερμοκηπίου καθώς και άλλες εξωτερικές επιδράσεις περιγράφονται σαν μία σταθερή διαταραχή που επιδρά αθροιστικά στην έξοδο του συστήματος [4]. Η θεώρηση της σταθερής διαταραχής οφείλεται στους χαμηλούς ρυθμούς μεταβολής του φαινομένου. Είναι σαφές ότι η επίδραση της διαταραχής στην έξοδο δεν επηρεάζεται από την παρουσία του ελεγκτή. Η διαταραχή διαμορφώνει απλώς τη στάθμη αναφοράς από την οποία υπολογίζουμε τη θερμοκρασία $Y(z)$.

5. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΕ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ

Η υλοποίηση του ελεγκτή προϋποθέτει την ύπαρξη ενός μετρητή θερμοκρασίας (αναλογικού ή ψηφιακού) καθώς ακόμη την ύπαρξη ενός οδηγού της βαλβίδας ρυθμιζόμενου από ηλεκτρική τάση. Τέλος το ο αλγόριθμος του ελεγκτή υλοποιείται σε ένα γρήγορο και ακριβές υπολογιστικό περιβάλλον το οποίο επιλέγεται να είναι ένας μικροελεγκτής.

5.1 Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή

Οι μικροελεγκτές είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα με λειτουργία ανάλογη με αυτή των μικροϋπολογιστών, με τη διαφορά ότι έχουν ενσωματωμένη μνήμη συνήθως στοιχεία παράλληλης αρχιτεκτονικής και, επιπλέον, πλεονεκτούν σημαντικά στο χειρισμό διαδικασιών εισόδου/εξόδου [10]-[15]. Οι διαδικασίες εισόδου/εξόδου είναι μια λειτουργία στενά συνδεδεμένη με την αρχιτεκτονική κατασκευής των μικροελεγκτών. Το σύνολο εντολών και η αρχιτεκτονική ενός μικροελεγκτή επιτρέπει στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας να ελέγχει άμεσα τις λειτουργίες εισόδου/εξόδου.

Οι μικροελεγκτές μπορούν να ελέγξουν ή να μεταβάλλουν τις τιμές των θυρών εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα, πολύ πιο γρήγορα από ότι οι μικροϋπολογιστές. Επιπλέον, οι μικροελεγκτές έχουν τη δυνατότητα να συσχετίζουν εξίσου γρήγορα τις λειτουργίες εισόδου/εξόδου με άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως τιμές μετρητών/χρονιστών. Στους μικροελεγκτές συναντώνται επίσης μορφές θυρών εισόδου/εξόδου με πιο πολύπλοκη λειτουργικότητα από αυτή των θυρών εισόδου/εξόδου που συναντώνται σε μικροελεγκτές. Για παράδειγμα υπάρχουν θύρες εισόδου με λειτουργία Α-Ψ μετατροπέα ή θύρες υψηλής ταχύτητας.

Η στενή συσχέτιση της λειτουργίας των μικροελεγκτών με τις διαδικασίες εισόδου/εξόδου, τους δίνει ένα σαφές προβάδισμα σε σχέση με τους μικροϋπολογιστές στις εφαρμογές που εμφανίζουν μεγάλο φόρτο λειτουργιών εισόδου/εξόδου, όπως είναι οι εφαρμογές συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Ακόμη, σημαντικό πλεονέκτημα των μικροελεγκτών είναι ότι διαθέτουν ενσωματωμένο Αρχείο Καταχωρητών καθώς και Αριθμητική/Λογική Μονάδα Καταχωρητών (Register Arithmetic Logic Unit, RALU). Το αρχείο καταχωρητών είναι μνήμη ενσωματωμένη στον μικροελεγκτή, που χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Ετσι περιορίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων προσβάσεων στη μνήμη και αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος. Η Αριθμητική/Λογική Μονάδα Καταχωρητών είναι ειδική μονάδα που επιτρέπει την εκτέλεση αριθμητικών και λογικών πράξεων απευθείας επάνω στα περιεχόμενα των καταχωρητών, χωρίς τη μεταφορά σε άλλους βοηθητικούς καταχωρητές. Η οικογένεια μικροελεγκτών MCS-96 αποτελείται από μικροελεγκτές υψηλής απόδοσης, με ΚΜΕ των 16 bits και τουλάχιστον 230 bytes ενσωματωμένης RAM [10-15].

Οι μικροελεγκτές είναι φτηνοί και ανθεκτικοί σε μεταβολές πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας. Για τους λόγους αυτούς προσφέρονται για γεωργικές εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου.

5.2 Εξειδίκευση των δεδομένων του προβλήματος

Ενδεικτικές τιμές για τους συντελεστές του συστήματος είναι [1]

$$\alpha = 14.5[\text{sec}/\text{C}^\circ], \kappa = 0.0278[1/\text{C}^\circ], \tau = 137[\text{sec}]$$

Η περίοδος δειγματοληψίας επιλέγεται έτσι ώστε να είναι μικρότερη ή ίση από την καθυστέρηση τ . Συγκεκριμένα επιλέγεται να είναι ίση με 30.51 [sec]. Η επιλογή αυτή διευκολύνει την υλοποίηση στον μικροελεγκτή επιπλέον προγραμμάτων εκτός από τον αλγόριθμο του ελεγκτή. Ειδικότερα ένα τέτοιο πρόγραμμα θα μπορούσε να είναι η ιστορική καταγραφή των δεδομένων καθώς και η αποθήκευση δεδομένων που σχετίζονται με καιρικές επιδράσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα ο νόμος ελέγχου εξειδικεύεται στην ακόλουθη μορφή

$$u(k) = -19.2553u(k-1) + 3.10376y(k) - 1.88417y(k-1) + 2.07999\omega(k) \quad (5.1)$$

Για την ταχύτερη εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχου στον μικροελεγκτή γίνεται η ακόλουθη προσέγγιση του νόμου ελέγχου

$$u(k) = -19.5u(k-1) + 3y(k) - 2y(k-1) + 2\omega(k) \quad (5.1)$$

όπου οι συντελεστές του ελεγκτή προσεγγίζονται με σφάλμα μικρότερο του 11%. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο προσεγγιστικός ελεγκτής διατηρεί την ευστάθεια του συστήματος κλειστού βρόχου. Επιπλέον σημειώνεται ότι ο προσεγγιστικός ελεγκτής οδηγεί την έξοδο πλησίον της στάθμης επιθυμητής συμπεριφοράς με σφάλμα μικρότερο του 7%.

5.3 Λίστα του προγράμματος του μικροελεγκτή

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη: α) Προγραμματισμός του τμήματος που υλοποιεί τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου που είναι απαραίτητες για τη σχεδίαση νόμου ελέγχου ανατροφοδότησης. β) Προγραμματισμός του τμήματος που μετατρέπει την τιμή της βαλβίδας, που προσδιορίζεται από τον ελεγκτή, σε κατάλληλη εντολή που μπορεί να μεταβάλει την βαλβίδα. γ) Προγραμματισμός του αλγορίθμου που υλοποιεί το νόμο ελέγχου, δηλαδή προσδιορίζει τις τιμές της μεταβολής της βαλβίδας. Ο προγραμματισμός του αλγορίθμου του νόμου ελέγχου παρουσιάζει το κύριο ενδιαφέρον για αυτό και παρουσιάζεται. Ο προγραμματισμός γίνεται σε μικροελεγκτή 80C196KC της INTEL. Λεπτομέρειες για τις εντολές προγραμματισμού του μικροελεγκτή 80C196KC της INTEL μπορούν να αναζητηθούν στη σχετική βιβλιογραφία (βλ. [10-15]).

Για να διευκολυνθεί η κατανόηση του προγράμματος γίνονται οι ακόλουθες επισημάνσεις: α) Το πρόγραμμα έχει γραφεί έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεστεί με την πλατφόρμα αξιολόγησης (evaluation board) του 80C196KC. β) Οτι ακολουθεί μετά από ";" είναι σχόλιο.

Στη λίστα που ακολουθεί παρουσιάζεται πρόγραμμα για τον μικροελεγκτή 80C196KC, το οποίο υλοποιεί τον ελεγκτή (5.2) κάτω από τις ακόλουθες υποθέσεις: α) οι αρχικές τιμές εισόδου, εξόδου και εξωτερικής εισόδου της διεργασίας είναι μηδενικές και β) η εξωτερική είσοδος είναι ίση με 8.

Το πρόγραμμα αποτελείται από τρία μέρη: το κυρίως πρόγραμμα και δύο υπορουτίνες SYSTEM και CONTROL. Η υπορουτίνα SYSTEM λαμβάνει τα δεδομένα των μεταβλητών του συστήματος από μετρήσεις και δεν παρουσιάζεται εδώ παρά το γεγονός ότι καλείται στη λίστα. Η υπορουτίνα CONTROL υπολογίζει σε κάθε εκτέλεσή της την τρέχουσα τιμή της εισόδου του συστήματος, που προκύπτει σαν έξοδος του ελεγκτή. Το κυρίως πρόγραμμα αρχικοποιεί τις

μεταβλητές, καλεί σε κάθε στιγμή δειγματοληψίας τις ρουτίνες SYSTEM και CONTROL και ελέγχει αν έχει πραγματοποιηθεί ο απαιτούμενος ρυθμός επαναλήψεων. Ο προσδιορισμός των χρονικών στιγμών δειγματοληψίας γίνεται με τη βοήθεια του TIMER1. Σημειώνεται ότι η ρουτίνα SYSTEM δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές συγκριτικά με αντίστοιχες ρουτίνες που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία (βλ. π. χ. [10]).

Οι τιμές της εξόδου της διεργασίας αποθηκεύονται στον πίνακα TABLE_OUT. Στον πίνακα αυτό μπορούν να αποθηκευτούν το πολύ 10 τιμές. Η πρώτη τιμή που αποθηκεύεται είναι η έξοδος του συστήματος τη χρονική στιγμή -2. Η εκτέλεση του προγράμματος σταματά όταν ο πίνακας γεμίσει, δηλαδή όταν έχει αποθηκευτεί και η τιμή της εξόδου στη χρονική στιγμή .

Οι τιμές της εισόδου αποθηκεύονται στον πίνακα TABLE_IN.

Λίστα

```

EXAM      MODULE MAIN, STACKSIZE(20)
$INCLUDE(8096.INC)
SIZE EQU 10
TIME EQU 3051
RSEG AT 30H
RSV: DSW 8 ; δεσμευμένες θέσεις μνήμης
RSEG
Y_PREV1: DSW 1
Y_PREV2: DSW 1
Y_NEW: DSW 1
Y_TEMP: DSW 1
U_PREV1: DSW 1
U_PREV2: DSW 1
U_NEW: DSL 1
U_TEMP: DSW 1
W_PREV1: DSW 1
PTR_Y: DSW 1
PTR_U: DSW 1
COUNT_TIME: DSW 1
COUNT: DSB 1
DSEG
TABLE_OUT: DSW SIZE
TABLE_IN: DSW SIZE
CSEG AT 2080H
LD SP, #STACK
LD PTR_U, #TABLE_IN ; ο δείκτης PTR_U δείχνει στην αρχή
; του πίνακα TABLE_IN
LD PTR_Y, #TABLE_OUT ; ο δείκτης PTR_Y δείχνει στην αρχή
; του πίνακα TABLE_OUT

LDB COUNT, #0
LD COUNT_TIME, #0
LD Y_PREV2, #0 ; Αρχική τιμή εξόδου y(-2)
LD Y_PREV1, #0 ; Αρχική τιμή εξόδου y(-1)
LD U_PREV2, #0 ; Αρχική τιμή εισόδου u(-2)
LD U_PREV1, #0 ; Αρχική τιμή εισόδου u(-1)
LD W_PREV1, #0 ; Αρχική τιμή εξωτερικής εισόδου w(-1)

```

```

LDB IOC1, #00000100B      ; όταν ο TIMER1 φτάνει την τιμή 65535,
                           ; το bit0 του INT_PENDING θα γίνεται ίσο με 1

LDB WSR, #0FH
LD TIMER1, #0D8EFH        ; αρχικοποίηση TIMER1
CLRB WSR
CLRB INT_PENDING ; αγνοούνται προηγούμενες υπερχειλίσεις του TIMER1
WAIT:
JBC INT_PENDING, 0, WAIT  ; αναμονή υπερχειλίσης TIMER1
                           ; χρονική στιγμή δειγματοληψίας

CLRB INT_PENDING
LDB WSR, #0FH
LD TIMER1, #0D8EFH        ; αρχικοποίηση TIMER1
CLRB WSR
INC COUNT_TIME
CMP COUNT_TIME, #TIME
JLT WAIT
LD COUNT_TIME, #0
CALL SYSTEM                ; Λήψη του σήματος  $y(k)$ 
ST Y_NEW, [PTR_Y]         ; Αποθήκευση του  $y(k)$ 
ADD PTR_Y, #2
CALL CONTROL               ; Υπολογισμός του  $u(k)$ 
LD Y_PREV2, Y_PREV1       ;  $Y\_PREV2 = y(k-1)$ 
LD Y_PREV1, Y_NEW         ;  $Y\_PREV1 = y(k)$ 
LD U_PREV2, U_PREV1       ;  $U\_PREV2 = u(k-1)$ 
LD U_PREV1, U_NEW         ;  $U\_PREV1 = u(k)$ 
LD W_PREV1, #8            ;  $W\_PREV1 = 8$ 
ST U_NEW, [PTR_U]        ; Αποθήκευση του  $u(k)$ 
ADD PTR_U, #2
INCB COUNT
CMPB COUNT, #SIZE        ; αν ο πίνακας έχει γεμίσει ( $k = 9$ )
                           ; σταματά η επανάληψη των εντολών

JLT WAIT
BR $
CONTROL:
LD U_TEMP, #0            ;  $U\_TEMP = 0$ 
SUB U_TEMP, U_PREV1      ;  $U\_TEMP = -u(k-1)$ 
SUB U_TEMP, Y_NEW        ;  $U\_TEMP = -u(k-1) - y(k)$ 
ADD U_TEMP, Y_PREV1      ;  $U\_TEMP = -u(k-1) - y(k) + y(k-1)$ 
ADD U_TEMP, W_PREV1      ;  $U\_TEMP = -u(k-1) - y(k) + y(k-1) + w(k-1)$ 
SHL U_TEMP, #1          ;  $U\_TEMP = -2u(k-1) - 2y(k) + 2y(k-1) + 2w(k-1)$ 
SUB U_TEMP, Y_NEW        ;  $U\_TEMP = -2u(k-1) - 3y(k) + 2y(k-1) + 2w(k-1)$ 
SUB U_TEMP, U_PREV1      ;  $U\_TEMP = -3u(k-1) - 3y(k) + 2y(k-1) + 2w(k-1)$ 
LD U_NEW, U_TEMP
LD U_TEMP, U_PREV1       ;  $U\_TEMP = u(k-1)$ 
SHL U_TEMP, #4          ;  $U\_TEMP = 16u(k-1)$ 

```

```

SUB U_NEW, U_TEMP ; U_NEW = -19u(k - 1) - 3y(k) + 2y(k - 1) + 2w(k - 1)
LD U_TEMP, U_PREV1 ; U_TEMP = u(k - 1)
SHR U_TEMP, #1 ; U_TEMP = 0.5u(k - 1)
SUB U_NEW, U_TEMP ; U_NEW = -19.5u(k - 1) - 3y(k) + 2y(k - 1) + 2w(k - 1)
RET
END

```

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προτάθηκε η τεχνική του ακριβούς ταιριάσματος σε μοντέλο για τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο. Κατασκευάστηκε πρόγραμμα σε μικροελεγκτή για την υλοποίηση του νόμου ελέγχου. Οι μικροελεγκτές αποτελούν ένα φτηνό και ευέλικτο εργαλείο που είναι εξαιρετικά χρήσιμο για γεωργικές εφαρμογές.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Valentine and J. van Zeeland, "Adaptive Split-range control of a greenhouse heating system", *Acta Hort.*, Vol. 106, pp. 109-115, 1980.
- [2] J.C. Baker, "Greenhouse climate control: Constraints and limitations", *Acta Hort.*, Vol. 399, pp. 26-32, 1995.
- [3] G.P.A. Both, "Greenhouse climate control", **Greenhouse Climate Control and Intergrated Approach**, Wageningen Press, Wageningen, pp. 211-247, 1995.
- [4] A. Setiawan, L. D. Albright, and R. M. Phelan, "Simulation of Greenhouse Air Temperature Control using PI and PDF Algorithms", *Proc. of 1st IFAC Workshop on Control Applications and Ergonomics in Agriculture*, pp. 111-116, Athens, Greece, 1998.
- [5] A.N.M. de Koning, "More efficient use of base load heating with a temperature integrating control programme. Effect on development, growth and production of tomato". CEC-Workshop: Microcomputer Control Systems in Energy-saving Greenhouses, Dublin, 1987.
- [6] B.K. Jacobson, P.H. Jones, J.W. Jones and J. A. Paramore, "Real-Time Greenhouse Monitoring and Control with Expert systems", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 3, pp. 273-285, 1989.
- [7] A. J. Udkin Ten Cate, "Analysis and Synthesis of Greenhouse Climate controllers", *Computer Applications in Agriculture Enviroments* Eds: J. A. Clark, K. Gregson, R.A. Saffell, Butterworths, 1987.
- [8] A. J. Udkin Ten Cate, "Modelling and (adaptive) control of greenhouse climates", *Netherlands Journal of Agriculture Science*, vol. 32, pp. 137-139, 1984.
- [9] K. J. Astrom and B. Wittenmark, **Computer Controlled Systems (Theory and Design)**, Prentice-Hall Int., New Jersey, 1984.
- [10] Φ. Ν. Κουμπουλής, **Βιομηχανικός Έλεγχος**, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα 1999.
- [11] **Embedded Applications**, INTEL 1993-1994.
- [12] **Embedded Microcontrollers and Processors**, INTEL, 1993.
- [13] **MSC-96, Macro Assembler User's Guide for DOS Systems**, INTEL, 1990.
- [14] **MCS-96, Utilities User's Guide for DOS Systems**, INTEL, 1990.
- [15] **EV80C196KC Evaluation Board User's Manual**, INTEL, 1992.
- [16] A. Baille, "L' aide a la decision dans la gestion du climat sous serre: De nouvelles perspectives", P.H.M.-Revue Horticole, no. 315, pp. 5156, 1991.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΣΕΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Αντώνης Μυστριώτης και Δημήτρης Μπριασούλης
Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής και Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη εργασία αυτή παρουσιάζεται ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου για ημικυλινδρικό θερμοκήπιο με τη βοήθεια προσομοιώσεων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Η αριθμητική αυτή μέθοδος είναι δυνατόν να αντικαταστήσει ικανοποιητικά τα πειράματα ανεμοσήραγγας. Το μέτωπο του ανέμου στο οριακό επιφανειακό στρώμα της ατμόσφαιρας όπου βρίσκεται το εξεταζόμενο κτίριο περιγράφεται αριθμητικά από τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, ώστε ο προσπίπτων άνεμος να αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες. Με τη βοήθεια αυτών των υπολογιστικών πειραμάτων είναι δυνατόν να ελεγχθούν υποθέσεις που περιλαμβάνονται στους υπάρχοντες Κανονισμούς σχεδιασμού.

NUMERICAL SIMULATIONS OF WIND LOADS OVER GREENHOUSE STRUCTURES

Antonis Mistriotis and Dimitris Briassoulis
Department of Agricultural Engineering
Agricultural University of Athens
Iera Odos 75, 11855 Athens

SUMMARY

The wind loads for a semi-cylindrical greenhouse have been analysed using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. This numerical method can successfully simulate the expensive wind-tunnel experiments. The wind profile in the atmospheric boundary surface layer, where the studied structures lie, is realistically simulated by proper boundary conditions. Through these numerical experiments, the validity of design directives included in the current Standards for greenhouse construction may be investigated.

1. Εισαγωγή

Τα θερμοκήπια είναι απλές και ελαφρές μεταλλικές ή ξύλινες κατασκευές. Ο σκελετός είναι σχεδιασμένος ώστε να εξασφαλίζει την απαιτούμενη αντοχή χωρίς όμως να σκιάζει υπερβολικά τα καλλιεργούμενα φυτά. Ο άνεμος είναι η συχνότερη αιτία αστοχίας των θερμοκηπίων [1]. Για το λόγο αυτό η σωστή εκτίμηση των φορτίων ανέμου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για το σωστό σχεδιασμό των θερμοκηπίων.

Τα μεταλλικά θερμοκήπια γενικώς θα πρέπει να σχεδιάζονται βάσει των σχετικών Ευρωκωδίκων για δράσεις και σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών [2,3]. Οι ιδιαιτερότητες όσον αφορά τον χρόνο ζωής των κατασκευών αυτών, αλλά και οι λειτουργικές απαιτήσεις και οι ειδικές συνθήκες όσον αφορά τα φορτία, είχαν οδηγήσει από χρόνια (στην Ευρώπη) στην δημιουργία κάποιων ειδικών εθνικών προδιαγραφών για θερμοκήπια. Μεταξύ των προδιαγραφών για τα θερμοκήπια που ισχύουν στις διάφορες χώρες υπάρχουν διαφορές όσο αφορά κυρίως τα φορτία οι οποίες οφείλονται στις ιδιαιτερότητες της κάθε χώρας αλλά και στους τύπους θερμοκηπίων που επικρατούν. Πρόσφατα δημιουργήθηκε στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) ένας γενικός, συμβουλευτικός χαρακτήρα κανονισμός που θα αφορά τον σχεδιασμό θερμοκηπίων (υπό ψήφιση) [3]. Ο κανονισμός αυτός έχει συμπληρωματικό χαρακτήρα και είναι (ή θα πρέπει να είναι) σε συμφωνία με τους Ευρωκωδικές δράσεων και σχεδιασμού. Η Ελλάδα όπως και τα υπόλοιπα μέλη της C.E.N. έχει συμβάλει στην δημιουργία του κανονισμού αυτού τόσο όσο αφορά τις γενικότερες αρχές όσο και σχετικά με τα δεδομένα που αφορούν στις ειδικές συνθήκες της χώρας μας κυρίως μέσω του καθορισμού κατάλληλων συντελεστών φορτίων.

Όσον αφορά το σχεδιασμό θερμοκηπίων η βελτιστοποίηση της κατασκευής ως προς οικονομικά και λειτουργικά κριτήρια είναι εξ' ίσου σημαντική με την αντοχή της. Επιπλέον, οι ιδιαιτερότητες των κατασκευών αυτών όσον αφορά τα φορτία, και συγκεκριμένα τις ανεμοπιέσεις, δεν έχουν μελετηθεί συστηματικά. Για τους λόγους αυτούς, η απλή εφαρμογή των Κανονισμών, όπου η ασφάλεια και η αντοχή της κατασκευής είναι το κύριο ζητούμενο, είναι πιθανό να οδηγήσει σε μη ικανοποιητικές θερμοκηπιακές κατασκευές από άποψη σχεδιασμού. Είναι λοιπόν αναγκαία η περαιτέρω επιστημονική έρευνα ώστε να μελετηθούν σε βάθος τα φορτία ανέμου που ασκούνται σε θερμοκήπια.

Τα φορτία ανέμου προσδιορίζονται στους Κανονισμούς σχεδιασμού κτιρίων από τα τοπικά κλιματικά και τοπογραφικά δεδομένα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Ειδικότερα, η κατανομή της πίεσης λόγω του ανέμου πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του θερμοκηπίου εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Η επίδραση του σχήματος στην κατανομή αυτή περιγράφεται στους Κανονισμούς σχεδιασμού κτιρίων από τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης c_p , ο οποίος ορίζεται ως:

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

όπου P_e είναι η εξωτερική πίεση στο κάλυμμα του θερμοκηπίου, v_w είναι η ταχύτητα του ανέμου υπολογισμένη σε ένα ύψος αναφοράς και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα.

Οι συντελεστές πίεσης για τους πιο χαρακτηριστικούς τύπους κτιρίων έχουν μετρηθεί με πειράματα πλήρους κλίμακας ή ανεμοσήραγγας και τιμές σχεδιασμού δίνονται στους αντίστοιχους Κανονισμούς. Όμως οι τιμές των συντελεστών πίεσης των κανονισμών είναι αρκετά γενικές καθώς αφορούν οποιοδήποτε κτίριο και δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τα ειδικά προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό των θερμοκηπίων. Επιπλέον, οι υπάρχοντες Κανονισμοί δεν δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό χαμηλών

κατασκευών με ύψος μικρότερο από το πάχος του επιφανειακού στρώματος αέρα όπου η ροή είναι έντονα διαταραγμένη λόγω της αλληλεπίδρασης του ανέμου με την επιφάνεια του εδάφους. Τα θερμοκήπια είναι συνήθως χαμηλές κατασκευές και αυτός είναι ο κύριος λόγος που θα πρέπει να μελετηθούν ειδικά.

Αριθμητικές προσομοιώσεις γνωστές με τον όρο Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι δυνατόν να δώσουν ρεαλιστικές τιμές για συντελεστές πίεσης συγκρίσιμες με αυτές που μετρώνται από πειράματα πλήρους κλίμακας ή πειράματα σε ανεμοσήραγγα [4,5]. Οι τεχνικές λεπτομέρειες της υπολογιστικής αυτής τεχνικής παρουσιάζονται στην εργασία αυτή και ως παράδειγμα υπολογίζονται οι συντελεστές πίεσης στο κάλυμμα ενός τοξωτού θερμοκηπίου (τούνελ). Η καθιέρωση τέτοιων υπολογιστικών πειραμάτων και η εξακρίβωση της πιστότητας των αποτελεσμάτων μπορεί να προσφέρει μια εναλλακτική λύση για τον προσδιορισμό των συντελεστών πίεσης αντί για τα πολύ ακριβά πειράματα ανεμοσήραγγας.

2. Μεθοδολογία – Προσομοιώσεις Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \phi \bar{v} = \bar{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \bar{\nabla} \phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

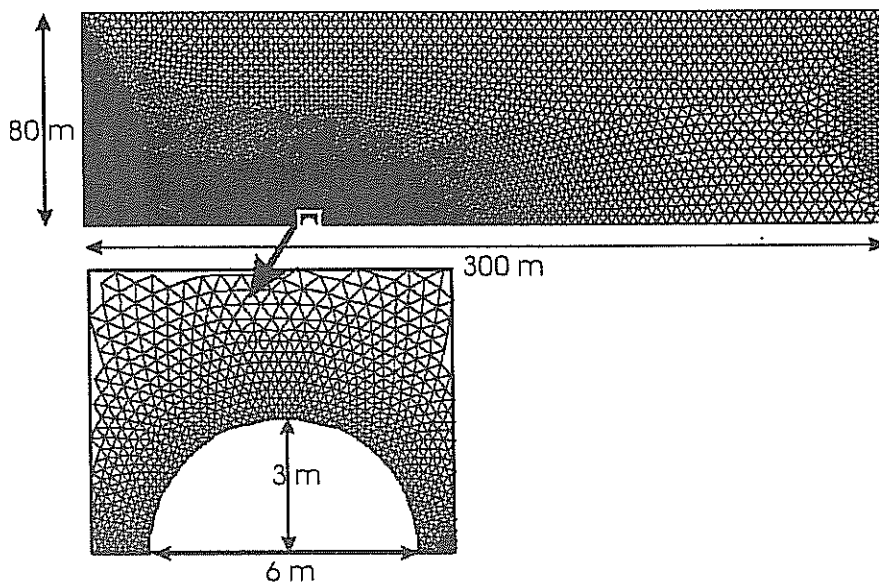
όπου \bar{v} είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, Γ_{ϕ} είναι ο συντελεστής διάχυσης και S_{ϕ} είναι ο όρος πηγής. Το σύμβολο ϕ εκφράζει τη συγκέντρωση του μεταφερόμενου μεγέθους (μάζας, ορμής, ενέργειας, κ.λ.π.). Για παράδειγμα, στη περίπτωση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας), το ϕ αντιστοιχεί στη πυκνότητα ρ . Αν το μεταφερόμενο μέγεθος είναι η ορμή, το ϕ αντιστοιχεί σε $\rho \bar{v}$. Σε αυτή τη περίπτωση η εξίσωση (3) αντιπροσωπεύει τις τρεις εξισώσεις διατήρησης της ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes) που αντιστοιχούν στις τρεις συνιστώσες του διανύσματος $\rho \bar{v}$.

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

3. Αποτελέσματα

Μελετήθηκε ένα τοξωτό θερμοκήπιο (τούνελ) ημικυλινδρικού σχήματος με ακτίνα 3 m και υπολογίστηκαν αριθμητικά οι συντελεστές πίεσης. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη βοήθεια του εμπορικού πακέτου λογισμικού ANSYS v.5.5.3. Θεωρώντας ότι το μήκος του θερμοκηπίου είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρό του, οι συντελεστές πίεσης για άνεμο κάθετο με τον άξονα του θερμοκηπίου υπολογίστηκαν με διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση.

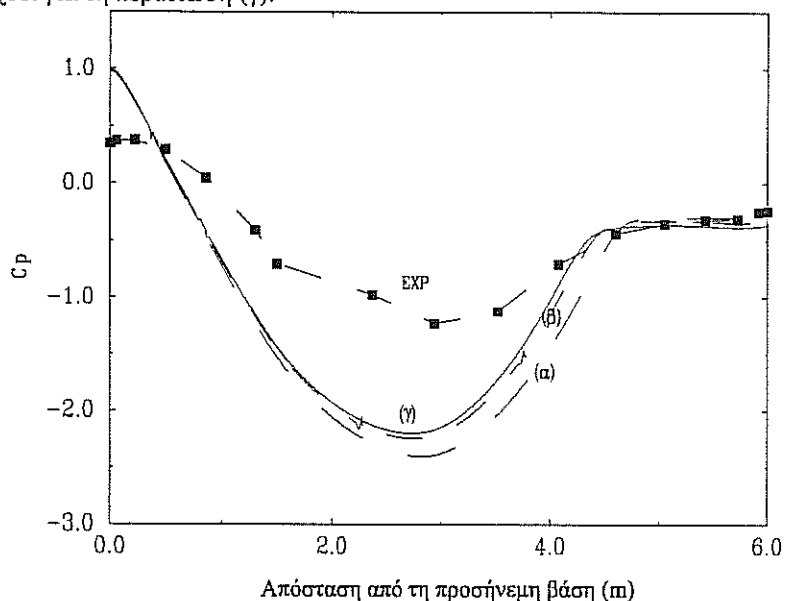
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, το θερμοκήπιο θεωρείται τοποθετημένο μέσα σε ανεμοσήραγγα πολύ μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα παρεμπόδισης της ροής. Οι διαστάσεις της ανεμοσήραγγας είναι 80x300 m (σχήμα 1) και το θερμοκήπιο είναι τοποθετημένο 80 m μετά την είσοδο της. Για τις ανάγκες της υπολογιστικής μεθόδου, ο χώρος διαίρεται σε στοιχεία έτσι ώστε η ροή να είναι δυνατόν να περιγραφεί λεπτομερώς εκεί όπου αναμένεται να εμφανιστούν στρόβιλοι και ιδιαίτερα κατά μήκος της επιφάνειας του καλύμματος του θερμοκηπίου όπου πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια η πίεση. Αντίθετα μακριά από το θερμοκήπιο, τα στοιχεία μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερα, αφού δεν απαιτείται λεπτομερής περιγραφή της ροής. Για να μειωθεί λοιπόν ο χρόνος υπολογισμού και η απαιτούμενη μνήμη, τα στοιχεία κοντά στο άνω τοίχωμα της ανεμοσήραγγας είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από αυτά κοντά στο θερμοκήπιο. Το σχήμα 1 δείχνει μια τυπική διαίρεση του χώρου της ανεμοσήραγγας σε στοιχεία για τις ανάγκες της προσομοίωσης αυτής.



Σχήμα 1: Διαμέριση του χώρου που αναπαριστά την ανεμοσήραγγα σε στοιχεία. Οι διαστάσεις της ανεμοσήραγγας είναι 80x300 m, ενώ η ακτίνα του τοξωτού θερμοκηπίου είναι 3 m. Τα στοιχεία που είναι κοντά στο θερμοκήπιο είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερα από τα πιο απομακρυσμένα.

Το μέτωπο του ανέμου στην είσοδο της ανεμοσήραγγας προσομοιώνεται με τον ορισμό κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για τη ταχύτητα του ανέμου [5]. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν υποθέτουμε τη λογαριθμική εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος όπως προτείνεται και από τον Ευρωκώδικα-1 [2]. Η ακρίβεια του αριθμητικού αποτελέσματος εξαρτάται από το μέγεθος των στοιχείων ειδικά στη περιοχή που περιβάλλει το θερμοκήπιο. Για το λόγο αυτό τρεις διαφορετικές κατανομές στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν για τον αριθμητικό υπολογισμό των συντελεστών πίεσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται στο σχήμα 2 ώστε να

διαπιστωθεί σύγκλιση της λύσης. Οι τρεις καμπύλες που παρουσιάζουν τα αριθμητικά αποτελέσματα αντιστοιχούν σε α) 720 σημεία, β) 900 σημεία και γ) 1200 σημεία κατά μήκος του καλύμματος του θερμοκηπίου. Το σχήμα 2 δείχνει ότι η σύγκλιση είναι δυσκολότερη κοντά στη κορυφή του θερμοκηπίου. Η μικρή ποσοτική διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των περιπτώσεων (β) και (γ) δείχνει ότι σύγκλιση έχει ήδη επιτευχθεί για τη περίπτωση (γ).



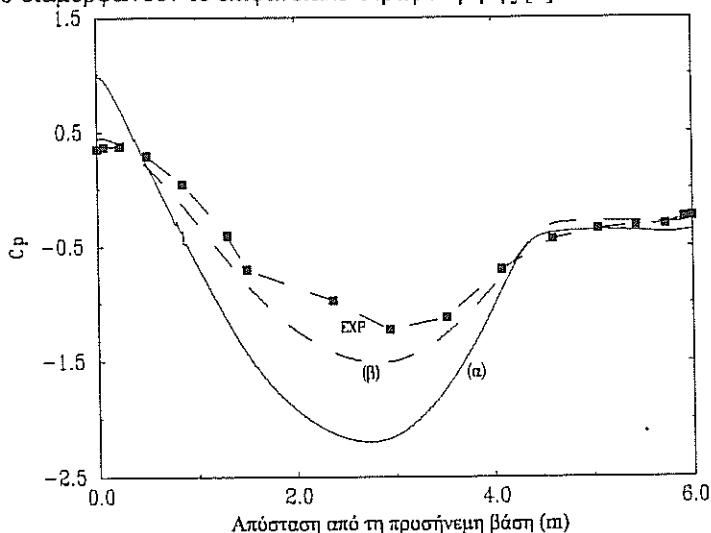
Σχήμα 2: Αριθμητικά υπολογισμένοι συντελεστές πίεσης σε τοξωτό ημικυλινδρικό θερμοκήπιο ακτίνας 3 m: α) 720, β) 900, και γ) 1200 κόμβοι κατά μήκος του καλύμματος του θερμοκηπίου όταν το μέτωπο του ανέμου είναι λογαριθμικό. Οι αριθμητικές τιμές συγκρίνονται με μετρήσεις πλήρους κλίμακας (EXP).

Στο ίδιο σχήμα 2, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά που έχουν μετρηθεί σε πείραμα πλήρους κλίμακας [6]. Παρά τη ποιοτική ομοιότητα που παρατηρείται, το αριθμητικό αποτέλεσμα φαίνεται να υπερεκτιμά το συντελεστή πίεσης στην προσήνεμη πλευρά του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τον αντίστοιχο πειραματικό [6]. Έχει αποδειχθεί [5] ότι η διαφορά αυτή οφείλεται στην παραμόρφωση του λογαριθμικού μετώπου του ανέμου στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας όπου η αλληλεπίδραση του ανέμου με το έδαφος και πιθανά φυσικά ή τεχνητά εμπόδια είναι ιδιαίτερα έντονη. Το πάχος του στρώματος αυτό που ονομάζεται στρώμα τριβής, εξαρτάται από τη διαμόρφωση του εδάφους της περιοχής και οι τιμές σχεδιασμού που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα-1 παρουσιάζονται στο πίνακα 1. Οι Κανονισμοί σχεδιασμού προτείνουν απλώς μια μέγιστη τιμή ταχύτητας ανέμου για το στρώμα αυτό.

Πίνακας 1: Τύποι εδάφους και οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού του μήκους τριβής και του πάχους του επιφανειακού στρώματος τριβής [2].

Τύπος εδάφους	z_0 (m)	z_{min} (m)
Ανώμαλη ανοικτή περιοχή χωρίς εμπόδια	0.01	2
Αγροτική περιοχή	0.05	4
Ημιαστική ή βιομηχανική περιοχή	0.30	8
Αστική περιοχή	1.00	16

Η περιγραφή του μετώπου του ανέμου με απλή συνάρτηση (π.χ. λογαριθμική) στο στρώμα τριβής δεν είναι δυνατή. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η διαμόρφωση του μετώπου του ανέμου με έμμεσο τρόπο. Δηλαδή θεωρούμε ένα εμπόδιο μικρού ύψους τοποθετημένο μπροστά στο θερμοκήπιο. Το εμπόδιο αυτό προσομοιώνει τυχαία χαμηλά εμπόδια που διαμορφώνουν το επιφανειακό στρώμα τριβής [5].



Σχήμα 3: Αριθμητικά υπολογισμένοι συντελεστές πίεσης σε τοξωτό ημικυλινδρικό θερμοκήπιο ακτίνας 3 m: α) όταν το μέτωπο του ανέμου είναι λογαριθμικό, β) όταν το μέτωπο του ανέμου έχει αλλοιωθεί από εμπόδιο ύψους 1 m και πάχους 0.2 m. Οι αριθμητικές τιμές συγκρίνονται με μετρήσεις πλήρους κλίμακας (EXP).

Το σχήμα 3 δείχνει την επίδραση ενός ορθογώνιου εμποδίου ύψους 1 m και πλάτους 0.2 m στους συντελεστές πίεσης του ημικυλινδρικού τοξωτού θερμοκηπίου. Το εξεταζόμενο θερμοκήπιο είναι χαμηλό, με ύψος 3 m, και βρίσκεται εξ ολοκλήρου μέσα στο επιφανειακό στρώμα τριβής που για αγροτικές περιοχές έχει ύψος περίπου 4 m από την επιφάνεια του εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα-1 (πίνακας 1). Για το λόγο αυτό η απόκλιση του μετώπου του ανέμου από τη λογαριθμική μορφή έχει έντονη επίδραση στους συντελεστές πίεσης. Αυτό γίνεται φανερό στο σχήμα 3, όπου οι αριθμητικά υπολογισμένοι συντελεστές πίεσης παρουσία του εμποδίου συμφωνούν ικανοποιητικά με τις πειραματικές τιμές ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε αδιατάρακτο λογαριθμικό μέτωπο ανέμου δίνουν υπερεκτιμημένους συντελεστές πίεσης.

4. Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη προηγούμενη παράγραφο δείχνουν τα ιδιαίτερα προβλήματα που εμφανίζονται τόσο στη μέτρηση όσο και στον αριθμητικό υπολογισμό των συντελεστών πίεσης σε χαμηλά κτίρια όπως είναι τα θερμοκήπια. Η κύρια αιτία των προβλημάτων αυτών είναι η αστάθεια και η μη-προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς του ανέμου στο επιφανειακό στρώμα τριβής της ατμόσφαιρας. Η ανώμαλη αυτή συμπεριφορά οφείλεται στην αλληλεπίδραση του ανέμου με φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως θάμνους, μεμονωμένα δένδρα, φράχτες, μικρά κτίρια κ.λ.π. που απαντώνται συχνά σε αγροτικές περιοχές.

Ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ανέμου με το ανάγλυφο του εδάφους, η συνήθης λογαριθμική εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος δεν ισχύει σε ένα λεπτό οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας που για αγροτικές περιοχές είναι περίπου 4 m παχύ. Μετρήσεις πλήρους κλίμακας των συντελεστών πίεσης που γίνονται σε χαμηλά κτίρια με ύψος μικρότερο από το πάχος του οριακού στρώματος τριβής τείνουν να υποεκτιμούν τα φορτία ανέμου που αφορούν υψηλότερες κατασκευές ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Για το λόγο αυτό η υιοθέτηση από γενικούς Κανονισμούς σχεδιασμού κατασκευών συντελεστών πίεσης που έχουν μετρηθεί με πειράματα πλήρους κλίμακας μπορεί να οδηγήσει σε κατασκευές όπου τα φορτία ανέμου έχουν υποεκτιμηθεί. Το σχήμα 2 δείχνει ότι η απόκλιση των μετρήσεων πλήρους κλίμακας για τους συντελεστές πίεσης σε χαμηλά κτίρια από τις τιμές που αντιστοιχούν σε ιδανικό λογαριθμικό μέτωπο ανέμου μπορεί να είναι μεγάλη (π.χ. 80% στο σχήμα 2). Αντίθετα, ο σχεδιασμός χαμηλών κτιρίων, όπως είναι τα θερμοκήπια, με βάση τους υπάρχοντες σήμερα γενικούς Κανονισμούς μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη κατασκευή ασφαλών κτιρίων, όπου όμως τα φορτία ανέμου έχουν πλεονάζοντα υπερεκτιμηθεί.

Ειδικά για τα θερμοκήπια, η υπερεκτίμηση φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε υπερσχεδιασμένες, ακριβές και μη λειτουργικές κατασκευές. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνει λεπτομερέστερη μελέτη των φορτίων ανέμου σε θερμοκήπια τόσο με πειραματικές όσο και με αριθμητικές μεθόδους.

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα της Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας «Προσφορά Σταδιοδρομίας στην Ελλάδα σε Ελληνόφωνους Ερευνητές του Εξωτερικού» (συμβόλαιο 97ΕΛ-100).

Βιβλιογραφία

1. Ι. Τσιρογιάννης, 1996. *Τύποι θερμοκηπίων στην Ελλάδα: αιτίες αστοχίας*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής και Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
2. Comite Europeen de Normalisation (C.E.N.), 1995. *Eurocode-1: Basis of design and actions on structures- Part 2-4 : Actions on structures "Wind actions"*, Brussels.
3. Comite Europeen de Normalisation (C.E.N.), 1999. *prEN 13031-1-Final Draft "Greenhouses : Design and construction Part 1 : Commercial production greenhouses"*, Brussels.
4. R.P. Hoxey, A.P. Robertson, B. Basara, B.A. Younis, 1993. Geometric parameters that affect wind loads on low-rise buildings: full-scale and CFD experiments. *J. of Wind Eng. and Industr. Aerodynamics*, 50, 243-252.

5. A. Mistriotis & D. Briassoulis, 2000. Numerical calculation of wind pressure coefficients for greenhouse structures, *submitted to J. of Wind Eng. and Industr. Aerodynamics*.
6. R.P. Hoxey & G.M. Richardson, 1983. Wind loads on film plastic greenhouses, *J. of Wind Eng. and Industr. Aerodynamics*, 11, 225-237.

**ΚΡΙΣΙΜΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΥΠΙΚΗ
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΣΤΑ
ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ prEN 13031-1:1999.
ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.**

Γιάννης Α. Τσιρογιάννης*, Δημήτρης Μπριασούλης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών,
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη της δομοστατικής απόκρισης μίας τυπικής Ελληνικής θερμοκηπιακής κατασκευής όταν επιβάλλονται σε αυτή ορισμένοι συνδυασμοί φορτίσεων. Ο έλεγχος στην πρώτη αυτή προσέγγιση αφορά απλό τοξωτό θερμοκήπιο. Η κατάρτιση των συνδυασμών έγινε σύμφωνα με τις σχέσεις που περιλαμβάνονται στους ευρωπαϊκούς κατασκευαστικούς κανονισμούς καθώς και στο προσχέδιο του νέου Ευρωπαϊκού κανονισμού για τον σχεδιασμό θερμοκηπίων, prEN-13031-1. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ο άνεμος παρουσιάζεται ως ο κυρίαρχος παράγοντας στους κρίσιμους συνδυασμούς φορτίσεων.

**CRITICAL LOAD COMBINATIONS FOR TYPICAL
MEDITERANEAN GREENHOUSE ACCORDING THE
EUROPEAN STANDARD FOR GREENHOUSES
prEN 13031-1. A FIRST APPROACH.**

Yannis L. Tsirogiannis, Demetres Briassoulis

Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Engineering,
Iera Odos 75, 11855 Athens Greece

ABSTRACT

In this paper evaluation is made of the structural response of a typical Hellenic greenhouse structure subjected in certain load combinations. The analysis in this first approach concerns a single-span tunnel greenhouse. The load combinations were considered according the rules given in the structural Eurocodes and the draft of the new European Standard for greenhouse design, prEN-13031-1. The analysis was carried out using the finite element method. Wind load appears to be the dominant variable action of the critical load combinations.

* Υπότροφος Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

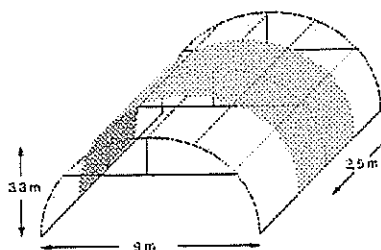
Τα θερμοκήπια όπως όλες οι κατασκευές υπόκεινται στην μεμονωμένη ή συνδυασμένη δράση διαφόρων φορτίων και μερικές φορές αστοχούν με αποτέλεσμα να προκαλούνται ζημιές στο σκελετό ή στο υλικό κάλυψής τους. Ο κίνδυνος των αστοχιών περιορίζεται σημαντικά με το σωστό σχεδιασμό και κατασκευή ενός θερμοκηπίου.

Για το σχεδιασμό και την κατασκευή των θερμοκηπίων εκτός από τους γενικότερους κατασκευαστικούς κανονισμούς έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται και ειδικοί κανονισμοί με σκοπό να καλύψουν τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι κατασκευές αυτές. Τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης προσπάθεια ώστε να συνταχθεί ένας ειδικός κανονισμός που θα αφορά τον σχεδιασμό θερμοκηπίων -prEN13031-1:1999 (prEN στη συνέχεια του κειμένου)¹- σε συμφωνία με τους Ευρωκώδικες δράσεων και σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται τα φορτία που επιβαρύνουν ένα τυπικό Ελληνικό θερμοκήπιο και καταρτίζονται οι συνδυασμοί τους σύμφωνα με τους κατασκευαστικούς Ευρωκώδικες και τον κανονισμό prEN. Στην συνέχεια γίνεται δομοστατική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση της κατασκευής με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS ώστε να βρεθούν ποιοι συνδυασμοί είναι οι κρίσιμοι και να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα για την εφαρμογή των Ευρωκώδικων και του προσχεδίου για τον κανονισμό σχεδιασμού θερμοκηπίων

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το θερμοκήπιο και η τοποθεσία εγκατάστασής του επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποτελούν αντιπροσωπευτική κατάσταση για την Ελλάδα. Όσον αφορά την τοποθεσία θεωρήθηκε ότι το θερμοκήπιο είναι εγκατεστημένο στην Κρήτη, σε τυπική αγροτική γη, σε σχεδόν οριζόντιο έδαφος με υψόμετρο περίπου 50 m από το επίπεδο της θάλασσας². Τέλος θεωρήθηκε ότι το θερμοκήπιο χρησιμοποιείται για καλλιέργεια τομάτας ή αγγουριού που συγκρατείται από τον σκελετό (από τον ελκυστήρα).



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση τμήματος του θερμοκηπίου

Σχετικά με την κατασκευή επιλέχθηκε ένα απλό τοξωτό θερμοκήπιο με μεταλλικό (χαλύβδινο) σκελετό και κάλυψη από πλαστικό φύλλο LDPE³. Τυπικές διαστάσεις βασικής κατασκευαστικής μονάδας για τοξωτά θερμοκήπια στην Ελλάδα είναι: ύψος 3-3,5 μέτρα, άνοιγμα 5-9 μέτρα και πλάτος 2-3 μέτρα.

Ο ελκυστήρας συνδέεται με αρθρώσεις με το τόξο ενώ ο ορθοστάτης συνδέεται και αυτός με αρθρώσεις με το τόξο επάνω και με τον ελκυστήρα κάτω. Η θεμελίωση γίνεται με προκατασκευασμένους κυλίνδρους από τσιμέντο στους οποίους είναι πακτωμένοι κύλινδροι με εξωτερική διάμετρο ίση με την εσωτερική διάμετρο του τόξου. Έτσι μπαίνουν μέχρι κάποιο ύψος στο εσωτερικό του σωλήνα του τόξου. Ο

υπολογισμός γίνεται για τυπικό τόξο (όχι ακραίο) του θερμοκηπίου και για φορτίσεις παράλληλες με το επίπεδο του τόξου, Σχήμα 1.

3. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΞΧΩΡΙΣΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Ο ισχύων Ελληνικός Κανονισμός Φορτίσεως Δομικών Έργων⁴ θεωρείται κυρίως όσον αφορά τα κλιματικά φορτία ξεπερασμένος με βάση τη σημερινή στάθμη των γνώσεων. Από την άλλη πλευρά οι Τεχνικές Προδιαγραφές Θερμοκηπίων είναι ανεπαρκείς για το σχεδιασμό ενός θερμοκηπίου. Έτσι για τον υπολογισμό των δράσεων και των συνδυασμών τους στο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε το προσχέδιο του κανονισμού prEN καθώς και οι αντίστοιχοι Ευρωκώδικες για υπολογισμό δράσεων στους οποίους αυτό αναφέρεται. Στην παρούσα εργασία δεν λήφθηκαν υπόψη οι σεισμικές δράσεις. Αυτό συνέβη επειδή η γενική τακτική που ακολουθείται για το σχεδιασμό με σεισμικά φορτία είναι να εφαρμόζονται ισοδύναμες πλευρικές δυνάμεις στην κατασκευή. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών βασίζεται στο βάρος της κατασκευής στην οποία εφαρμόζονται. Από τη στιγμή λοιπόν που τα θερμοκήπια είναι σχετικά ελαφρές κατασκευές το μέγεθος των ισοδύναμων αυτών δυνάμεων είναι πάντα πολύ μικρότερο σε σχέση με το μέγεθος άλλων πλευρικών φορτίων όπως π.χ. του ανέμου και για αυτό μπορούμε και να τα παραλείψουμε⁵. Τέλος όσον αφορά τον έλεγχο των διατομών του μεταλλικού θερμοκηπίου που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε ο Ευρωκώδικας 3, ο οποίος ισχύει επίσημα στην Ελλάδα.

Καταρχήν σύμφωνα με τον κανονισμό prEN πρέπει να γίνει κατάταξη της κατασκευής. Η διάρκεια λειτουργικής ζωής του θερμοκηπίου είναι 10 έτη, ακόμη το σύστημα κάλυψης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ανεκτικό σε παραμορφώσεις του σκελετού. Τέτοιου είδους θερμοκήπια κατηγοριοποιούνται ως B10 και μπορούν να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις οριακές καταστάσεις αστοχίας. Στην συνέχεια γίνεται αναλυτικός υπολογισμός των ξεχωριστών δράσεων -τα φορτία που συμμετέχουν στους συνδυασμούς για μόνιμες και πρόσκαιρες καταστάσεις είναι το βάρος της κατασκευής και του εξοπλισμού όσον αφορά τα μόνιμα και ο άνεμος, το χιόνι, το βάρος της αναρτημένης καλλιέργειας και το βάρος του πρόσκαιρου εξοπλισμού όσον αφορά τα μεταβλητά⁶ χρησιμοποιώντας τον prEN σε συνδυασμό με τους κατάλληλους Ευρωκώδικες στους οποίους αυτός παραπέμπει.

4. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΡΑΣΕΩΝ

Στην σημερινή γενιά των Ευρωκώδικων παρατίθεται μία σειρά συνδυασμών φορτίσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό μίας κατασκευής. Οι συνδυασμοί αυτοί συνοδεύονται από μία σειρά συντελεστών συνδυασμού ψ που αντιστοιχούν στις διάφορες επιμέρους φορτίσεις. Σήμερα, αν και υπάρχουν κατάλληλες μεθοδολογίες, η εκτίμηση των συντελεστών αυτών γίνεται κυρίως βάση της εμπειρίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της έλλειψης κατάλληλων μετεωρολογικών δεδομένων για στατιστική επεξεργασία.

Οι συνδυασμοί φορτίσεων και γενικότερα ο σχεδιασμός στα πλαίσια των Ευρωκώδικων αφορά δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων (καταστάσεις πέρα από τις οποίες μία κατασκευή θεωρείται πια ακατάλληλη για το σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε) της κατασκευής, τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και τις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σύμφωνα με τον prEN στο σχεδιασμό της συγκεκριμένης κατασκευής μπορούν να ληφθούν υπόψη μόνο οι οριακές καταστάσεις αστοχίας. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1⁷ οι συνδυασμοί για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας σε μόνιμες και πρόσκαιρες καταστάσεις, προκύπτουν από την εφαρμογή της βασικής σχέσης:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_p P_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{Qi} Q_{ki} \quad (1)$$

όπου:

- G_k η χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων δράσεων,
- P_k η χαρακτηριστική τιμή κάποιας δράσης προέντασης,
- Q_{k1} η χαρακτηριστική τιμή της κυρίαρχης μεταβλητής δράσης,
- Q_{ki} η χαρακτηριστικές τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών δράσεων,
- γ οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας των αντίστοιχων δράσεων και
- ψ οι συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων.

Ακόμη για λόγους απλοποίησης αντί της σχέσης (1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ποιο δυσμενής από τις ακόλουθες σχέσεις (2 και 3):

α) λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ποιο δυσμενή μεταβλητή δράση:

$$\sum_j \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} \quad (2)$$

β) λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυσμενείς μεταβλητές δράσεις:

$$\sum_j \gamma_{Gj} G_{kj} + 0,9 \sum_{i=1} \gamma_{Qi} Q_{ki} \quad (3)$$

Οι γενικοί κανόνες που θέτει ο Ευρωκώδικας 1 ακολουθούνται και από τον κανονισμό prEN που αφορά την φόρτιση θερμοκηπίων. Η διαφοροποίηση στην περίπτωση αυτή βρίσκεται στο ότι δεν δίνονται γενικές εκφράσεις από τις οποίες προκύπτουν οι συνδυασμοί για κάθε περίπτωση αλλά συγκεκριμένοι συνδυασμοί. Αυτοί χρησιμοποιούνται τόσο για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας όσο και για τις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας λαμβάνοντας υπόψη τους κατάλληλους συντελεστές. Αυτό το είδος παρουσίασης έχει προφανώς σκοπό την απλοποίηση της κατάρτισης των συνδυασμών. Όσον αφορά τους αντίστοιχους μερικούς συντελεστές και συντελεστές συνδυασμού, αυτοί προτείνονται από κάθε χώρα σε ειδικό παράρτημα.

Πίνακας 1. Συντελεστές συνδυασμού μεταβλητών φορτίσεων για την Ελλάδα κατά prEN13031-1:1999.

Φορτία			
Ανέμου	Χιονιού	Φυτών	Πρόσκαιρου εξοπλισμού
ψ _{0Q1}	ψ _{0Q2} or ψ _{2Q2}	ψ _{0Q3} or ψ _{2Q3}	ψ _{0Q5}
0,6/0,0	0,3 ή 0,6/0,0	1,0/0,0	0,0

Στην εργασία αυτή γίνεται κατάρτιση των συνδυασμών σύμφωνα με τον prEN. Τα φορτία συμμετέχουν στους συνδυασμούς όπως υπολογίστηκαν πριν πολλαπλασιασμένα με τους κατάλληλους μερικούς συντελεστές ασφαλείας και συντελεστές συνδυασμού που δίνονται για την Ελλάδα. Οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας που αφορούν οριακές καταστάσεις αστοχίας σύμφωνα με τον prEN που είναι ίσοι με 1,2 για όλα τα μόνιμα και μεταβλητά φορτία. Όσον αφορά του συντελεστές συνδυασμού που ισχύουν για την Ελλάδα αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Τελικά προέκυψαν προς εξέταση 42 συνδυασμοί φορτίσεων από τον prEN συν 8 συνδυασμοί από τις σχέσεις 2,3 που δεν περιέχονται στο προσχέδιο αλλά κρίθηκε

σκόπιμο να εξεταστεί αν κάποιος από αυτούς είναι κρίσιμότερος από τους συνδυασμούς του prEN.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε γραμμική και μη-γραμμική δομοστατική ανάλυση του τοξωτού πλαισίου της θερμοκηπιακής κατασκευής που υποβάλλεται στους συνδυασμούς φορτίσεων που αναφέρθηκαν. Η ανάλυση έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με χρήση του λογισμικού ANSYS.

6.1. Εφαρμογή των συνδυασμών στο γραμμικό μοντέλο (Θεωρία 1ης τάξης)

Καταρχήν έγινε γραμμική δομοστατική ανάλυση του μοντέλου του πλαισίου με το ANSYS. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των εντατικών μεγεθών που προέκυψαν από την ανάλυση και τον εντοπισμό της κρίσιμης τάσης λαμβάνονται από τον Ευρωκώδικα 3 και είναι οι εξής:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{yel,Rd}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{ypl,Rd}} \leq 1 \quad (5)$$

$$\frac{V_{Sd}}{V_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (6)$$

$$V_{Sd} \leq 0,5 \times V_{pl,Rd} \quad (7)$$

όπου:

N_{sd}	η τιμή σχεδιασμού της ορθής τάσης,
$N_{pl,Rd}$	η εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού,
$M_{y,Sd}$	η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης κατά τον άξονα y,
$M_{yel,Rd}$	η ελαστική αντοχή σχεδιασμού της ροπής κάμψης,
$M_{ypl,Rd}$	η πλαστική αντοχή σχεδιασμού της ροπής κάμψης,
V_{sd}	η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής τάσης και
$V_{pl,Rd}$	η διατμητική αντοχή σχεδιασμού.

Η σχέση 4 χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αντοχής της διατομής κατά την ελαστική ανάλυση μια και έχουμε ταυτόχρονη παρουσία αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές για κάθε μία από τις δύο διατομές. Για τον έλεγχο αντοχής σε τέμνουσα χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις 6 και 7.

Επειδή οι διατομές σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 είναι κατηγορίας 1, μπορεί να ληφθεί ως ροπή αντοχής αντί για την ελαστική η πλαστική ροπή⁸ και να χρησιμοποιηθεί η σχέση 5. Για να υπολογιστεί η πλαστική ροπή θεωρήθηκε συντελεστής σχήματος $\alpha_{pl}=1,27$ μια και έχουμε σωληνωτές διατομές. Κατά την πλαστική ανάλυση έγινε αξιολόγηση του αν υπάρχει αλληλεπίδραση τέμνουσας-ροπής βάσει της σχέσης 7. Οι έλεγχοι έγιναν σε όλες τις διατομές όλων των στοιχείων της κατασκευής.

Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές των σχέσεων αλληλεπίδρασης, από όπου προέκυψε ότι οι τρεις κρίσιμότεροι συνδυασμοί είναι με σειρά φθίνουσας κρίσιμότητας οι:

$$1, 2xG_{k1}+1, 2xG_{k2}+1, 2xQ_{k1} \quad (8)$$

$$1, 2xG_{k1}+1, 2xG_{k2}+1, 2xQ_{k1}+1, 2x0, 6xQ_{k2} \quad (9)$$

$$1, 2xG_{k1}+1, 2xG_{k2}+1, 2xQ_{k1}+1, 2xQ_{k3} \quad (10)$$

όπου:

G_{k1}	το βάρος της κατασκευής,
G_{k2}	το βάρος του μόνιμου εξοπλισμού,
Q_{k1}	το φορτίο ανέμου,
Q_{k2}	το φορτίο χιονιού και
Q_{k3}	το φορτίο φυτών.

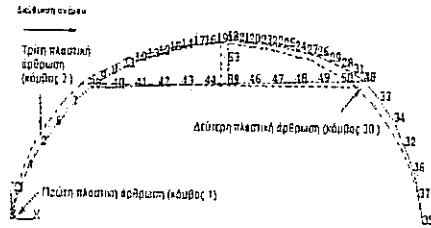
6.2. Εφαρμογή των κρίσιμων συνδυασμών στο μη-γραμμικό μοντέλο (Θεωρία 2ης τάξης)

Στην συνέχεια έγινε μη-γραμμική ανάλυση του τόξου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μη-γραμμική ανάλυση εφαρμόστηκε στους τρεις κρίσιμότερους συνδυασμούς όπως προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση του θερμοκηπίου (σχέσεις 8,9 και 10). Και στους τρεις αυτούς συνδυασμούς κύριο μεταβλητό φορτίο είναι ο άνεμος διεύθυνσης 0° (κάθετος στον κορφιά) σε συνδυασμό με αρνητική εσωτερική πίεση.

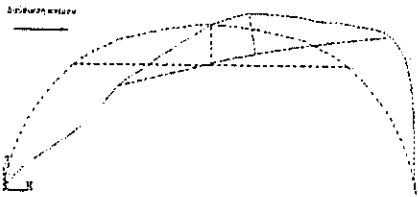
Στο μη-γραμμικό μοντέλο η πραγματική συμπεριφορά του χάλυβα προσεγγίστηκε με διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Ακόμη ενεργοποιήθηκε η επίδραση στα εντατικά μεγέθη της εμφάνισης μεγάλων παραμορφώσεων στην κατασκευή. Στη συγκεκριμένη ανάλυση δεν λήφθηκε υπόψη η ειδική συμπεριφορά των λεπτότοιχων σωλήνων που αφορά την μεταβολή της γεωμετρίας της διατομής και την πιθανή εμφάνιση τοπικού λυγισμού που αναφέρεται σε άλλους μελετητές. Η μη-γραμμική επίλυση για τους τρεις κρίσιμότερους συνδυασμούς έδειξε ότι η αστοχία προκαλείται σε όλες τις περιπτώσεις λόγω της μετατροπής της κατασκευής σε μηχανισμό με τη δημιουργία τριών πλαστικών αρθρώσεων διαδοχικά στους ίδιους κόμβους με την εξής σειρά: πρώτα στον κόμβο 1, στην συνέχεια στον 30 και τέλος στον 2. Οι θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων φαίνονται στο Σχήμα 2 ενώ στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ο τύπος κατάρρευσης του τόξου.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης. Πριν γίνει ο σχολιασμός του πίνακα είναι απαραίτητο να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο προέκυψαν οι τιμές που περιέχει. Καταρχήν ως αναφορά χρησιμοποιήθηκε η τιμή της ταχύτητας του ανέμου που αντέχει η κατασκευή σε κάθε ένα από τους συνδυασμούς. Επιλέχθηκε ο άνεμος γιατί αποτελεί το κυρίαρχο φορτίο σε όλους τους κρίσιμους συνδυασμούς που εξετάστηκαν και η ταχύτητά του επειδή είναι μία φυσική ποσότητα της οποίας η σύγκριση είναι άμεσα κατανοητή. Η πρώτη στήλη του πίνακα περιέχει τις καταστάσεις φόρτισης που μελετήθηκαν (π.χ. κρίσιμοι συνδυασμοί) ενώ η δεύτερη αναφέρει το λόγο κατάρρευσης της κατασκευής. Στις δύο επόμενες στήλες (τρίτη και τέταρτη) υπάρχει η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου σε m/s την οποία αντέχει η συγκεκριμένη κατασκευή υπό την επίδραση του κάθε συνδυασμού. Η ταχύτητα αυτή υπολογίστηκε από το μέγιστο φορτίο ανέμου που αντέχει η κατασκευή αν γίνει υπολογισμός της αντοχής της με χρήση γραμμικής ανάλυσης και κριτηρίων αντοχής από τον Ευρωκώδικα 3 που λαμβάνουν υπόψη τους την ελαστική και πλαστική αντοχή της διατομής σε ροπή κάμψης αντίστοιχα (σχέσεις 4 και 5). Η μετατροπή έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη σχεδιαστική ζωή της κατασκευής (10 έτη), την τραχύτητα του ανάγλυφου (Κατηγορία II), το εξωτερικό και εσωτερικό ύψος αναφοράς (3,3 m), το μήκος της βασικής κατασκευαστικής μονάδας του θερμοκηπίου (2,5 m) και τον αρνητικό συντελεστή εσωτερικής πίεσης για διεύθυνση ανέμου 0° ($C_{pi} = -0,2$). Αυτά είναι τα χαρακτηριστικά της κατάστασης που ανταποκρίνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Στην πέμπτη στήλη του πίνακα 2 των τελικών αποτελεσμάτων, περιλαμβάνεται η ταχύτητα ανέμου που προέκυψε με ανάλογο τρόπο από το φορτίο ανέμου τη στιγμή της κατάρρευσης σε κάθε συνδυασμό. Το φορτίο αυτό υπολογίστηκε με τη μη-γραμμική ανάλυση με το ANSYS. Η τελευταία (έκτη στήλη) περιέχει την ποσοστιαία διαφορά της τιμής της μέγιστης ανεκτής ταχύτητας ανέμου της μη-γραμμικής ανάλυσης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τη γραμμική ανάλυση με χρήση της πλαστικής αντοχής (ποσοστιαία διαφορά στηλών 5 και 4).



Σχήμα 2. Πλαστικές αρθρώσεις και σειρά τους



Σχήμα 3. Τύπος κατάρρευσης του τόξου

Το ότι με τη χρήση της πλαστικής αντοχής στην σχέση αλληλεπίδρασης (σχέση 4, στήλη 4 του πίνακα 2) η κατασκευή παρουσιάζεται να αντέχει μεγαλύτερο φορτίο ανέμου είναι λογικό αφού με τη χρήση της πλαστικής αντοχής λαμβάνεται υπόψη η πλαστική συμπεριφορά των χαλύβδινων στοιχείων και έτσι δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε και να χρησιμοποιήσουμε με ασφάλεια μικρότερες διατομές για τα ίδια φορτία.

Πίνακας 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων δομοστατικής ανάλυσης της κατασκευής

Συνδυασμός	Αιτία κατάρρευσης	Μέγιστη ανεκτή ταχύτητα ανέμου (m/s)			
		Γραμμική ανάλυση, ελαστική αντοχή	Γραμμική ανάλυση, πλαστική αντοχή	Μη-γραμμική ανάλυση	Ποσοστιαία διαφορά στηλών 4 και 5
a16		15,88	17,88	14,65	-18,05 %
a114	Δημιουργία μηχανισμού	16,05	18,07	13,64	-24,52 %
a110		16,36	18,47	15,08	-18,35 %
Απαιτήσεις αντοχής prEN13031-1:1999 για ταχύτητα ανέμου (m/s) :					32,50

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη ενός κανονισμού -prEN- για το σχεδιασμό θερμοκηπίων έρχεται να συμπληρώσει κάποια κενά που παρουσιάζει η εφαρμογή των Ευρωκωδίκων στην περίπτωση των θερμοκηπιακών κατασκευών (π.χ. συντελεστές ανεμοπίεσης ή συντελεστές φορτίου χιονιού για θερμοκήπια). Κατά την εφαρμογή του προσχεδίου παρατηρήθηκε ότι στην ουσία δεν αλλάζουν παρά ορισμένοι συντελεστές σε σχέση με τους Ευρωκώδικες για τον υπολογισμό των αντίστοιχων φορτίσεων, ενώ η μεθοδολογία παραμένει ίδια. Όσον αφορά τους συνδυασμούς φορτίσεων που προτείνονται παρατηρήθηκαν ορισμένες παρεκκλίσεις από το γενικότερο πνεύμα των

κατασκευαστικών Ευρωκωδίκων οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στο πνεύμα απλοποίησης που επικρατεί στο προσχέδιο.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης της συγκεκριμένης τυπικής Ελληνικής κατασκευής προκύπτει ότι οι κρίσιμότεροι συνδυασμοί έχουν ως κύριο μεταβλητό φορτίο το φορτίο ανέμου διεύθυνσης 0° (ικάθετη στον κορφιά) με αρνητική εσωτερική πίεση (Cri-). Αν συγκρίνουμε τα κρίσιμα φορτία που προέκυψαν από τη μη-γραμμική ανάλυση με τις αντίστοιχες αντοχές σχεδιασμού που προτείνει ο Ευρωκώδικας 3 λαμβάνοντας υπόψη τόσο ελαστική όσο και πλαστική αντοχή σε ροπή κάμψης, παρατηρούμε ότι τα κρίσιμα φορτία της ανάλυσης εμφανίζονται μειωμένα κατά 20% περίπου από το φορτίο κατάρρευσης που υπολογίζουμε με τη μη-γραμμική ανάλυση. Επομένως η γραμμική ανάλυση δίνει αντοχές αρκετά μεγαλύτερες της πιο ρεαλιστικής αντοχής που προκύπτει από τη μη-γραμμική ανάλυση.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι ο prEN προτείνει διαφορετικούς μερικούς συντελεστές ασφαλείας τόσο για τις μόνιμες όσο και για τις μεταβλητές δράσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους κατασκευαστικούς Ευρωκώδικες. Οι συντελεστές αυτοί παίρνουν τιμές 1,2 για μόνιμες και μεταβλητές δράσεις στον prEN και 1,35 και 1,5 αντίστοιχα στον Ευρωκώδικα 1, δηλαδή στον prEN παρουσιάζονται ελαττωμένοι κατά 11% και 20% αντίστοιχα. Η αιτία της μείωσης αυτής βρίσκεται μάλλον στον μικρότερο κίνδυνο που θεωρείται ότι παρουσιάζουν για την ανθρώπινη ζωή τα θερμοκήπια σε σχέση με τις κατοικίες και τις άλλες συναφείς κατασκευές. Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί ότι οι συντελεστές αυτοί έχουν προταθεί με βάση την εμπειρία χωρίς να συνοδεύονται από πειραματικά αποτελέσματα ή να έχει γίνει κάποιος έλεγχος της αξιοπιστίας τους. Ίσως λοιπόν θα έπρεπε να επαναπροσδιοριστούν οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας του prEN ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται με ασφάλεια για τις απλές θερμοκηπιακές κατασκευές η γραμμική αντί της πολύπλοκης μη-γραμμικής ανάλυσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

¹ C.E.N., 1999, "prEN 13031-1:1999 Greenhouses, Actions, Design, Construction Part1: Commercial Production Greenhouses", Brussels

² Τσιρογιάννης Ι.Α. 1996 «Τύποι θερμοκηπίων στην Ελλάδα και καταγραφή της αστοχίας τους», Πτυχιακή Μελέτη, Αθήνα

³ Briassoulis D., Waaijenberg D., Gratraud J., von Eslnr B., 1997, "Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses : Part I, General Overview", Journal of Agricultural Engineering Research V 67

⁴ Βασιλικό Διάταγμα (Β.Δ.), 1945. Ελληνικός κανονισμός φορτίσεως δομικών έργων

⁵ NGMA, 1997, "Standard for design loads in greenhouse structures"

⁶ Τσιρογιάννης Ι.Α., 1999, «Κρίσιμοι συνδυασμοί δράσεων για τυπική θερμοκηπιακή κατασκευή στην Ελλάδα», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αθήνα

⁷ C.E.N., 1994, "ENV 1991-1-1:1994 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures-Part 1: Basis of design", Brussels

⁸ Βάγιας Ι., Ερμούπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., 1998, "Σιδηρές κατασκευές Παραδείγματα εφαρμογής Ευρωκώδικα 3", Κλειδάριθμος, Αθήνα

⁹ Roux P., Robertson A.P., Motro R., 1997, "The design of slender monotubular steel arches", The structural Engineer, 75, 9

ΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΙ ΣΤΟΜΑΤΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΦΥΤΩΝ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΟΡΟΜΕΤΡΟ

Κάβουρας, Σ., Κατσούλας, Ν., Κίττας, Κ.

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής,
Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος,
Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

Περίληψη

Στην εργασία αυτή έγιναν μετρήσεις της αγωγιμότητας φύλλων υδροπονικής καλλιέργειας τριανταφυλλιάς. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας φύλλων και αέρα, της σχετικής υγρασίας του αέρα και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και των φύλλων. Οι μετρήσεις επέτρεψαν τη μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στη διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το μεγαλύτερο μέρος της διαπνοής οφειλόταν σε παράγοντες ακτινοβολίας και όχι μεταφοράς.

TRANSPIRATION AND STOMATAL CONDUCTANCE OF GREENHOUSE ROSE CROP. MEASUREMENTS BY POROMETER

Kavouras, S., Katsoulas, N., Kittas, C.

University of Thessaly, School of Agriculture, Crop and Animal Production
Laboratory of Agriculture Constructions and Environmental Control
Pedion Areos, 38334, Volos, Greece

ABSTRACT

Measurements of transpiration and stomatal conductance simultaneously to solar radiation, air and leaf temperature and air relative humidity measurements were carried out in a greenhouse soilless rose crop. The influence of solar radiation and vapour pressure deficit on transpiration and canopy conductance was studied. The results showed that the crop was decoupled from the atmosphere and transpiration rate was near to the equilibrium rate.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καθαρή ενέργεια που δέχεται κάθε φυτική μάζα μετατρέπεται κυρίως σε αισθητή και λανθάνουσα ενέργεια. Στην περίπτωση των καλλιεργειών, αυτό που καθορίζει το ποσοστό της ενέργειας που μετατρέπεται στη μια ή την άλλη μορφή είναι η συμπεριφορά των στομάτων. Μεταξύ των άλλων προσεγγίσεων που επιτρέπουν τον υπολογισμό των ποσοστών αυτών είναι και η παραδοχή του «μεγάλου φύλλου» («big leaf»), όπως δίνεται από την εξίσωση των Penman – Monteith [1]. Η προσέγγιση αυτή έχει αποκτήσει μεγάλη αποδοχή, λόγω της απλότητάς της και της αποτελεσματικότητάς της. Στην παραδοχή αυτή, η συνολική στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας αντιπροσωπεύεται από μία τιμή η οποία θεωρείται ότι είναι συγκρίσιμη με αυτή του απλού φύλλου και ότι επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες.

Η στοματική αγωγιμότητα, στο επίπεδο του φύλλου ή της καλλιέργειας, έχει συσχετιστεί με την ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα και το υδατικό δυναμικό του φύλλου. Παρόλα αυτά, μέχρι τώρα δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο μηχανιστικό μοντέλο το οποίο να προβλέπει το άνοιγμα των στομάτων και μόνο εμπειρικές μέθοδοι είναι διαθέσιμοι. Για περισσότερο από 20 χρόνια, η πιο κοινή εξίσωση η οποία εκφράζει την επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη συμπεριφορά των στομάτων είναι η ονομαζόμενη εξίσωση του Jarvis [2]. Στην εξίσωση αυτή, η στοματική αγωγιμότητα εκφράζεται ως μία μέγιστη αγωγιμότητα που πολλαπλασιάζεται με μία σειρά ανεξαρτήτων μεταξύ τους παραγόντων οι οποίοι προκαλούν στρες στην καλλιέργεια και δρουν πολλαπλασιαστικά για το τελικό αποτέλεσμα. Η αντίδραση των στομάτων στην ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα και τη συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα, επηρεάζει και τη φωτοσύνθεση και ως εκ τούτου η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του αέρα και η συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα, μπορεί να ερμηνευθεί μέσα από την φωτοσύνθεση. Από την άλλη πλευρά όμως, δεν είναι εύκολο να κατανοηθεί η φυσιολογική βάση της απευθείας επίδρασης της υγρασίας του αέρα στη συμπεριφορά των στομάτων. Δεν υπάρχει προς το παρόν κάτι γενικά αποδεκτό ως προς το μηχανισμό που εμπλέκεται στο φαινόμενο αυτό [3]. Παρόλα αυτά τα στόματα φαίνεται να αντιδρούν στο ρυθμό διαπνοής και όχι στην υγρασία του αέρα αυτή καθαυτή [4].

Η στοματική αγωγιμότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο του νερού, της ενέργειας και της φωτοσύνθεσης [5]. Τιμές της στοματικής αγωγιμότητας μπορεί να μετρηθούν με τη μέθοδο της πορομετρίας. Παράλληλα, η πορομετρία επιτρέπει την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας [6]. Παρόλα αυτά, σε πολλές εργασίες τα αποτελέσματα της σύγκρισης της αγωγιμότητας, όπως αυτή εκτιμάται με το πορόμετρο, με την αγωγιμότητα που εκτιμάται με άλλες μεθόδους, δεν είναι ικανοποιητικά, [7]. Ο Verhoef, (1997) [8], βρήκε ότι οι τιμές της αγωγιμότητας που μέτρησε με το πορόμετρο διέφεραν σημαντικά από τις τιμές που μέτρησαν οι Hanan and Prince, (1997) [9], με άλλες μεθόδους, στην ίδια καλλιέργεια και την ίδια τοποθεσία. Επιπλέον, τιμές της αγωγιμότητας της καλλιέργειας που υπολογίστηκαν από μετρήσεις με το πορόμετρο, λαμβάνοντας υπόψη τη φυλλική επιφάνεια, ήταν μεγαλύτερες κατά έναν παράγοντα 2-3 από αυτές που υπολογίστηκαν με αντιστροφή της εξίσωσης των Penman – Monteith, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της διαπνοής, [10]. Οι τιμές της αγωγιμότητας που μετρούνται με τις δύο παραπάνω μεθόδους, συχνά θεωρούνται ότι επηρεάζονται από τους ίδιους παράγοντες, αν και έχει αποδειχθεί, θεωρητικά και πειραματικά ότι οι δύο αυτές μετρήσεις δεν είναι ίδιες [11]. Ο υπολογισμός της αγωγιμότητας από την αντιστροφή της εξίσωσης των Penman –

Monteith, εμπεριέχει επιπρόσθετες πληροφορίες που σχετίζονται με την καθαρή ακτινοβολία και την αεροδυναμική αγωγιμότητα μέσα στην καλλιέργεια [11].

Ο βαθμός στον οποίο η διαπνοή μιας καλλιέργειας ελέγχεται από τα στόματα εξαρτάται από το βαθμό σύζευξης μεταξύ των φύλλων και του αέρα. Ο παράγοντας που περιγράφει τη σχετική συνεισφορά των παραγόντων ακτινοβολίας και μεταφοράς στη διαπνοή της καλλιέργειας είναι ο παράγοντας Ω και παίρνει τιμές από 0 έως 1 [12]. Όταν το φύλλο δεν είναι συζευγμένο με τον αέρα, ο παράγοντας Ω παίρνει τιμές κοντά στο 1, ενώ όταν η στοματική αγωγιμότητα είναι πολύ μεγάλη και το φύλλο είναι πλήρως συζευγμένο με τον αέρα ο Ω παίρνει τιμές κοντά στο 0.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι, με τη βοήθεια μετρήσεων με πορόμετρο, να παρουσιάσει και να συζητήσει την επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα μιας υδροπονικής καλλιέργειας τριανταφυλλιάς, όπως αυτή παρουσιάζεται από μετρήσεις με πορόμετρο.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Θερμοκήπιο και καλλιέργεια

Οι μετρήσεις έγιναν το καλοκαίρι και το φθινόπωρο του 1999 σε γυάλινο θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίνου. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο το θερμοκήπιο ήταν ασπρισμένο. Η υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (*Rosa hybrida* cv. First Red), ήταν εγκατεστημένη σε σάκους με περλίτη με πυκνότητα 6 φυτά/m². Η άρδευση και η λίπανση γινόταν κάθε ώρα με σύστημα στάγδην το οποίο ελεγχόταν αυτόματα από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η καλλιέργεια ήταν διαμορφωμένη με την τεχνική “bending” σύμφωνα με την οποία οι βλαστοί οι οποίοι δεν θεωρείται ότι θα δώσουν ικανοποιητικής ποιότητας άνθη, λυγίζονται και αφήνονται πλάγια. Η τεχνική αυτή επιτρέπει να επιτευχθεί μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια διαθέσιμη για φωτοσύνθεση, αυξάνοντας ταυτόχρονα την συνεισφορά της καλλιέργειας στην ψύξη του θερμοκηπίου μέσω της διαπνοής. Η αγωγιμότητα των φύλλων μετρήθηκε με πορόμετρο σταθερής κατάστασης (LI-1600M, LICOR Inc., Lincoln, NE, USA). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε επιλογή διαφόρων φύλλων μέσα στην καλλιέργεια σε σχέση με την ηλικία τους και τη θέση τους πάνω στο φυτό (φύλλα ανθοφόρων ή πλάγιων βλαστών). Οι κατηγορίες στις οποίες έγινε ο διαχωρισμός με βάση την ηλικία τους ήταν: (α) νεαρής ηλικίας φύλλα, μικρότερα των 15 ημερών, (β) ώριμα φύλλα, 15-30 ημερών, (γ) μέσης ηλικίας φύλλα 30-45 ημερών και (δ) υπερώριμα φύλλα, μεγαλύτερα των 45 ημερών. Οι μετρήσεις γίνονταν καθ’ όλη τη διάρκεια της ημέρας, ανά χρονικό διάστημα 30 λεπτών. Κάθε μισή ώρα γινόταν μέτρηση σε 20 περίπου φύλλα της ίδιας περίπου θέσης και ηλικίας και από τις μετρήσεις αυτές υπολογιζόταν ο μέσος όρος. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας (R_s), θερμοκρασίας αέρα (T_a) και φύλλων (T_c) και υγρασίας του αέρα. Παράλληλα με τις μετρήσεις της αγωγιμότητας με το πορόμετρο έγιναν και μετρήσεις της διαπνοής με λυσίμετρο.

2.3 Υπολογισμοί

Η στοματική αγωγιμότητα g_s των φύλλων υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$g_s = \frac{g_a \cdot g_i}{g_a - g_i} \quad (1)$$

όπου g_a και g_i η αεροδυναμική και η ολική αγωγιμότητα των φύλλων αντίστοιχα ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Η g_i μετρήθηκε με το πορόμετρο ενώ η g_a θεωρείται, κατά την μέτρηση με το πορόμετρο, σταθερή.

Η διαπνοή υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$E = g_i \frac{e_i - e_a}{P} \quad (2)$$

όπου E είναι η διαπνοή σε μονάδες ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), g_i είναι η ολική αγωγιμότητα ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), e_a (kPa) είναι η πίεση ατμών του αέρα και e_i (kPa) η πίεση ατμών του φύλλου στον κορεσμό, στη θερμοκρασία του φύλλου και P (kPa) είναι η ατμοσφαιρική πίεση στον τόπο μέτρησης.

Ο υπολογισμός του παράγοντα Ω έγινε με βάση την εξίσωση που πρότειναν οι Jarvis και McNaughton (1986), [6]:

$$\Omega = \frac{\Delta/\gamma + 1}{\Delta/\gamma + 1 + \frac{g_s}{g_a}} \quad (3)$$

όπου Δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμού του αέρα (Pa K^{-1}) και γ είναι η ψυχομετρική σταθερά (Pa K^{-1}).

Ο δείκτης υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας (CWSI) υπολογίστηκε όπως προτάθηκε από τους Jackson et al., (1981), [13]. Η μέγιστη θερμοκρασία (T_M) που μπορεί να επιτευχθεί στην καλλιέργεια, για μια δεδομένη θερμοκρασία αέρα T_a δίνεται από την εξίσωση:

$$T_M = T_a + \frac{R_s}{g_a \rho C_p} \quad (5)$$

Η χαμηλότερη θερμοκρασία, T_m , επιτυγχάνεται όταν η αγωγιμότητα της καλλιέργειας είναι μέγιστη, g_M και υπολογίστηκε ως:

$$T_m = T_a + \frac{\left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_M}\right) \frac{R_s}{\rho C_p} - \frac{VPD}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma} + \frac{g_a}{g_M}} \quad (6)$$

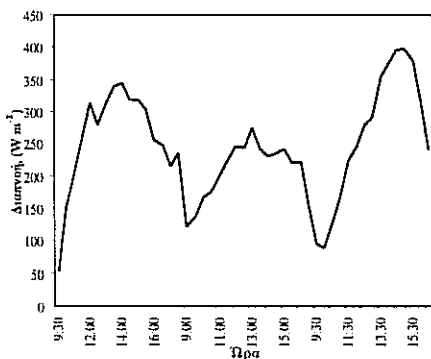
όπου ρ και C_p είναι αντίστοιχα η πυκνότητα (kg m^{-3}) και η ειδική θερμότητα ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) του αέρα υπό σταθερή πίεση και VPD είναι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Η g_M υπολογίστηκε από τη μέση τιμή των 10 μέγιστων τιμών της g_s κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Έτσι, ο δείκτης CWSI δίνεται από την εξίσωση:

$$CWSI = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \quad (7)$$

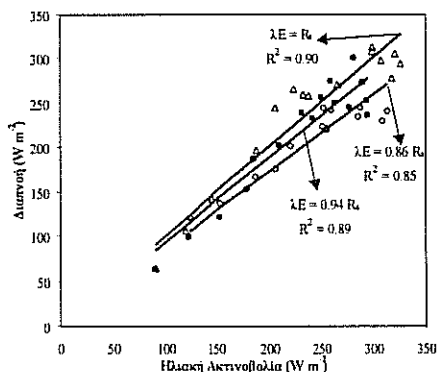
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Διαπνοή

Η πορεία της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας, παρουσιάζεται για διάφορες ημέρες στο Σχήμα 1. Από το Σχήμα 1 παρατηρούμε ότι η διαπνοή ακολουθεί μια περίπου κωδωνοειδή καμπύλη, με τη μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται κατά το ηλιακό μεσημέρι, περίπου στις 13:30. Η σχέση της διαπνοής με την ηλιακή ακτινοβολία για τρεις διαφορετικές ημέρες και για φύλλα παρόμοιας θέσης και ηλικίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η σχέση αυτή είναι περίπου ίδια για τις ημέρες που παρουσιάζονται.

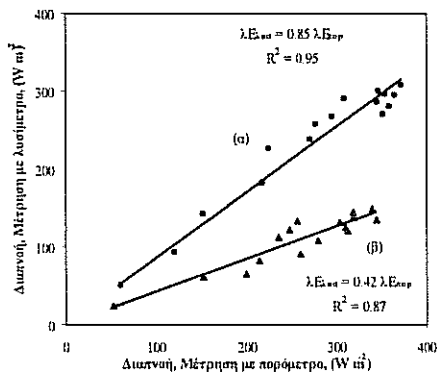


Σχήμα 1. Πορεία της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 2. Διαπνοή συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ μετρημένων τιμών της διαπνοής με το πορόμετρο και το λυσίμετρο. Οι μετρήσεις με το πορόμετρο αφορούν δύο κατηγορίες φύλλων: (α) ώριμα φύλλα (ηλικίας 15-30 ημερών) που βρίσκονται σε ανθοφόρους βλαστούς και (β) ώριμα φύλλα, (μέσης ηλικίας, 30-45 ημερών) που βρίσκονται σε πλάγιους, λυγισμένους βλαστούς. Οι μετρήσεις με το λυσίμετρο έγιναν σε 6 φυτά στα οποία η κατανομή της φυλλικής επιφάνειας ήταν: 70-80 % περίπου σε πλάγιους βλαστούς και 20-30% περίπου σε ανθοφόρους.



Σχήμα 3. Σχέση της διαπνοής της καλλιέργειας όπως αυτή υπολογίστηκε από μετρήσεις με το πορόμετρο με αυτή που μετρήθηκε με το λυσίμετρο. (α) Μετρήσεις με πορόμετρο σε φύλλα ηλικίας 30-45 ημερών, (β) Μετρήσεις με πορόμετρο σε φύλλα ηλικίας 15-30 ημερών.

3.2 Αγωγιμότητα

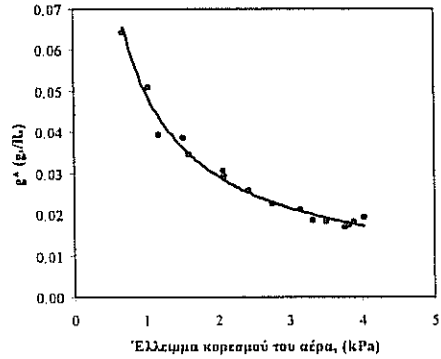
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η πορεία της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια τριών ημερών. Κάτι αντίστοιχο με την ημερήσια πορεία της διαπνοής φαίνεται να ισχύει και για τη στοματική αγωγιμότητα με τη διαφορά ότι οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται 2 με 3 ώρες νωρίτερα δηλαδή περίπου στις 11:00.

Παρατηρήθηκε ημερήσια υστέρηση στην πορεία της αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται).

Προκειμένου να απομακρυνθεί η υστέρηση και να μελετηθεί η επίδραση του ελλείμματος κορεσμού στην αγωγιμότητα υπολογίστηκε η κανονικοποιημένη αγωγιμότητα ($g^* = g_c/R_s$). Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η σχέση της κανονικοποιημένης αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.



Σχήμα 4. Ημερήσια πορεία της αγωγιμότητας.

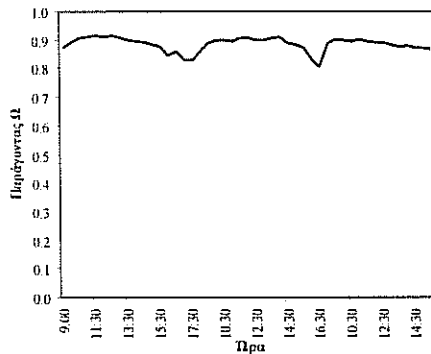


Σχήμα 5. Σχέση της g^* με το VPD

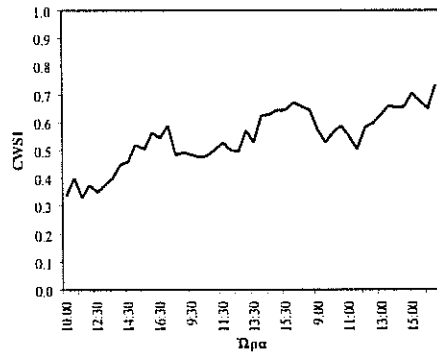
3.3 Παράγοντας Ω και CWSI

Με τη χρήση της εξίσωσης (3) υπολογίστηκε ο παράγοντας Ω . Η μέση τιμή του κατά τη διάρκεια των ημερών μέτρησης βρέθηκε ίση με 0.86. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία των τιμών του παράγοντα “ Ω ” για διάφορες ημέρες.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του CWSI, όπως υπολογίστηκε με την εξίσωση (7), για τρεις από τις ημέρες των παρατηρήσεων. Η μέση τιμή του CWSI βρέθηκε ίση με 0.54.



Σχήμα 5. Ημερήσια πορεία του Ω



Σχήμα 6. Ημερήσια πορεία του CWSI.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα επίπεδα της διαπνοής που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν αρκετά υψηλά, σε σχέση με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση φύλλων ηλικίας περίπου 15-30 ημερών τα οποία βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς, το 90 % περίπου της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε λανθάνουσα ενέργεια μέσω της διαπνοής (Σχήμα 2).

Παρατηρήθηκε παρόμοια πορεία στην καμπύλη της διαπνοής και της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχ. 1 και 4). Η μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας εμφανιζόταν περίπου στις 11:00 ενώ η μέγιστη τιμή της διαπνοής εμφανιζόταν μετά από δύο ώρες περίπου. Μέχρι τις 11:00 το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ήταν μικρότερο από τα 2 kPa. Από την ώρα αυτή και μετά το έλλειμμα κορεσμού ξεπερνούσε την κρίσιμη τιμή των 1.5-2 kPa και η αγωγιμότητα άρχιζε να πέφτει. Παρόλα αυτά η διαπνοή συνέχιζε να αυξάνεται, λόγω της μεγαλύτερης αύξησης του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, έως ότου φτάσει στη μέγιστη τιμή της στις 13:30 περίπου το μεσημέρι.

Η ομαλοποίηση της αγωγιμότητας με την ηλιακή ακτινοβολία απομάκρυνε την υστέρηση και μας επέτρεψε να δούμε την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού στην αγωγιμότητα (Σχ. 5). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κανονικοποιημένη αγωγιμότητα μειώνεται εκθετικά όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα αυξάνεται.

Οι τιμές του παράγοντα Ω , όπως αυτός υπολογίστηκε από την εξίσωση (3), που παρατηρήθηκαν ήταν σχετικά μεγάλες (μέση τιμή 0.86) και κοντά σε αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [12]. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που οι μετρήσεις έγιναν το καλοκαίρι όπου τα παράθυρα είναι ανοικτά και επικρατούν σχετικά υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με αυτές που επικρατούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αλλά χαμηλές συγκρινόμενες με τις εξωτερικές, το μεγαλύτερο μέρος της διαπνοής οφειλόταν σε παράγοντες ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι η καλλιέργεια δεν ήταν συζευγμένη με τον αέρα του θερμοκηπίου. Τέλος, οι τιμές της αγωγιμότητας που μετρήθηκαν στην προκειμένη περίπτωση με το πορόμετρο, βρέθηκαν κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν από μετρήσεις με λυσίμετρο από τους Katsoulas et al., (2000), [14], για μία μη συζευγμένη καλλιέργεια και μικρότερες κατά 50 % περίπου από τη μέση τιμή της αγωγιμότητας που υπολογίστηκε σε μια σχετικά συζευγμένη καλλιέργεια, υπό συνθήκες δροσισμού με τεχνητή ομίχλη.

Παρατηρήθηκε ότι ο CWSI είχε χαμηλές τιμές τις πρωινές ώρες και αυξανόταν συνεχώς στη συνέχεια έως ότου έπαιρνε τη μέγιστη τιμή του, νωρίς το απόγευμα. Η μέση τιμή του δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας (CWSI), όπως αυτός υπολογίστηκε από την εξίσωση (7), βρέθηκε ίση με 0.54. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η καλλιέργεια βρισκόταν σε μία μέση υδατική κατάσταση. Οι τιμές αυτές ήταν κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν από τους Kittas et al., (2000), [15], για μια καλλιέργεια με χαμηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI=2) και μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν από τους Katsoulas et al., (2000), [14], για μία καλλιέργεια με μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI=4).

Όταν τα φύλλα που μετρήθηκαν με το πορόμετρο βρίσκονταν σε πλάγιους, λυγισμένους βλαστούς, ηλικίας 30-45 ημερών, η σχέση της διαπνοής που μετρήθηκε με το λυσίμετρο σε συνάρτηση με αυτή που μετρήθηκε με το πορόμετρο ήταν: $E_{\lambda\sigma} \approx 0.85 E_{\text{πορ}}$, ενώ όταν τα φύλλα που μετρήθηκαν με το πορόμετρο βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς, ηλικίας 15-30 ημερών, η προηγούμενη σχέση γινόταν: $E_{\lambda\sigma} \approx 0.42 E_{\text{πορ}}$. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι:

- Η διαπνοή που υπολογίστηκε από φύλλα μέσης ηλικίας που βρίσκονταν χαμηλά, είναι κοντά στην τιμή της διαπνοής που υπολογίστηκε από το λυσίμετρο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση τιμή της ηλικίας των φύλλων ενός ώριμου φυτού είναι μεγαλύτερη από την ηλικία των φύλλων που μετρήθηκαν με το πορόμετρο στην προκειμένη περίπτωση.
- Τα φύλλα που βρίσκονταν σε ψηλότερη θέση και ήταν μικρότερης ηλικίας διέπνεαν με το διπλάσιο ρυθμό συγκρινόμενα με αυτά που βρίσκονταν χαμηλά και ήταν λίγο μεγαλύτερης ηλικίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται στα διαφορετικά ποσά

ακτινοβολίας που δέχονται τα φύλλα μεταξύ των δύο επιπέδων και στις διαφορές στην αεροδυναμική αγωγιμότητα που πιθανόν να υπάρχουν στα φύλλα μεταξύ των δύο θέσεων.

Ενδιαφέρον θα ήταν να μελετηθεί η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα επίπεδα μέσα στην καλλιέργεια και το φυτό. Παράλληλα, η μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων, η οποία μέχρι τώρα θεωρείται σταθερή στα διάφορα επίπεδα μέσα στην καλλιέργεια, σε συνάρτηση με την εκτίμηση της στοματικής αγωγιμότητας μέσα από αναλυτικά μοντέλα, στο επίπεδο του φυτού, θα βοηθήσει στην καλύτερη εκτίμηση του ρυθμού διαπνοής, στο επίπεδο του φυτού και της καλλιέργειας και στη βελτίωση του ελέγχου του κλίματος των θερμοκηπίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Monteith, J.L., 1981. Evaporation and surface temperature. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 107, 1-27.
2. Stewart, J.B., 1988. Modeling surface conductance of pine forest. *Agr. For. Meteorol.*, 43, 19-37.
3. Lhomme, J.P., Elguero, E., Chehbouni, A., Boulet, G., 1998. Stomatal control of transpiration: Examination of Monteith's formulation of canopy resistance. *Water Res. Research*, 34(9), 2301-2308.
4. Monteith, J.L., 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell Environ.*, 18, 357-364.
5. Pearcy, R.W., Ehleringer J.R., Mooney, H.A., Rundel, P.W., 1989. Plant physiological ecology: Field methods and Instrumentation. Chapman and Hall, London.
6. Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.*, 15, 1-49.
7. Sojka, R.E., Pearsons, J.E., 1983. Soybean water status and canopy microclimate relationships at four row spacings. *Agron. J.*, 75, 961-968.
8. Verhoef, A., 1997. The effect of temperature differences between porometer head and leaf surface on stomatal conductance measurements. *Plant, Cell Envir.*, 20, 641-646.
9. Hanan, N.P., Prince, S.D., 1997. Stomatal conductance of West Central Supersite vegetation in HAPEX-Sahel: measurements and empirical models. *J. Hydrol.*, HAPEX-Sahel special issue.
10. Huntingford, C., Allen, S.J., Harding, R.J., 1995. An intercomparison of single and dual-source vegetation-atmosphere transfer models applied to transpiration from Sahelian savannah. *Bound. Layer Meteorol.*, 74, 397-418.
11. Finnigan, J.J., Raupach, M.R., 1987. Modern theory of transfer in plant canopies in relation to stomatal characteristics. *Stomatal Function*, pp385-429. Stanford University Press, Stanford, CA.
12. Jarvis, P.G., 1985. Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. *Acta Hortic.*, 171, 184-205.
13. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J.Jr, (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Res. Research*. 17(4), 1133-1138.
14. Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C., 2000. Effect of misting on transpiration and conductances of greenhouse rose canopy. Submitted to *Agric. For. Meteorol.*
15. Kittas, C., Katsoulas, N., Baille, A., 2000. Influence of greenhouse ventilation regime on microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. Submitted to *J. Agric. Eng. Res.*

Η ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

**Μενέλαος Θεοχάρης
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Μ.Α.Ε. Γεωπονίας Πανεπ. Θεσσαλίας
Βασ. Κων/νου 121 , 47 100 Άρτα**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανεμοφόρτιση, η σοβαρότερη αιτία αστοχίας των θερμοκηπιακών κατασκευών, αντιμετωπιζόταν σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς (DIN1055), ή τους Ελληνικούς κανονισμούς (1946). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή τυποποίησης (CEN) δημιούργησε α) την Τεχνική Επιτροπή TC250 η οποία συνέταξε τον EC1, στο μέρος 2-4 του οποίου αντιμετωπίζεται η ανεμοφόρτιση των κτιριακών κατασκευών και β) την TC284 η οποία το 1997 συνέταξε το σχέδιο κανονισμών prEN13031-1:1997, βασισμένο στον EC1 με ειδικές προσαρμογές για τα θερμοκήπια. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η ανεμοφόρτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών για την Ελληνική πραγματικότητα.

Wind loads on greenhouse structures according to the Eurocodes

**Menelaos Theocharis
Civil Engineer N.T.U.A
Post-graduate in Agriculture, University of Thessaly
Vas. Con/nou 121 , 47 100 Arta**

ABSTRACT

Wind loads, the most important reason for failure of greenhouse structures, was calculated in accordance with the German (DIN1055) or the Greek regulations (1946). The European Committee for Standardization (CEN) created α) the Technical Committee TC250, which drew up the EC1, in the part 2-4 of which the wind loads on building structures are examined, and the TC284, which in 1997 drew up the regulation plan prEN13031-1:1997, based on EC1 with modifications for the greenhouses. This study examines the wind loads of greenhouse structures under the Greek conditions.

Η ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα φορτία ανέμου είναι φορτία πίεσης της κατασκευής και κατατάσσονται στις μεταβλητές ελεύθερες φορτίσεις. Κατά τη μελέτη της ανεμοφόρτισης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη επιρροή άλλων δράσεων στην κατασκευή (π.χ. χιόνι), οι οποίες είναι δυνατόν να επιφέρουν αλλαγές στην επιφάνεια αναφοράς, καθώς επίσης και αλλαγές του σχήματος της κατασκευής. Το μέρος 2-4 του Ευρωκώδικα 1 δίνει κανόνες και μεθόδους υπολογισμού των φορτίων ανέμου στις κτιριακές κατασκευές. Η απόκριση των κατασκευών και των επιμέρους στοιχείων τους στην ανεμοφόρτιση μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία μιάς "βασικής" και μιάς "συντονιστικής" συνιστώσας, όπου η βασική συνιστώσα ενεργεί ως οισονεί στατική, ενώ η συντονιστική ως δυναμική.

2. ΕΚΛΟΓΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ

Προβλέπονται δύο διαδικασίες για τον υπολογισμό της φόρτισης λόγω ανέμου, η απλή και η λεπτομερής.

- η απλή διαδικασία εφαρμόζεται στις κατασκευές τις οποίες οι δομητικές ιδιότητες δεν τις καθιστούν ευαίσθητες σε δυναμικές διεγέρσεις. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μετρίως δυναμικά δομήματα με την χρήση του δυναμικού συντελεστή, c_d . Οι τιμές αυτού του συντελεστή εξαρτώνται από τον τύπο της κατασκευής (από σκυρόδεμα, χάλυβα, σύμμεικτο), από το ύψος και το πλάτος της κατασκευής.
- η λεπτομερής διαδικασία εφαρμόζεται στις κατασκευές οι οποίες είναι πιθανώς ευαίσθητες σε δυναμικές διεγέρσεις και για τις οποίες ο δυναμικός συντελεστής, c_d , είναι μεγαλύτερος από 1,2.

Στις περιπτώσεις στις οποίες επιτρέπεται η εφαρμογή της απλής διαδικασίας, η λεπτομερής διαδικασία δίνει ακριβέστερα και συνήθως όχι τόσο συντηρητικά αποτελέσματα όσο η απλή διαδικασία. Οι τιμές του δυναμικού συντελεστή, c_d , για θερμοκήπια με χαλύβδινο σκελετό είναι, σύμφωνα με τον EC1 μικρότερος από 1,00 σε κάθε περίπτωση. Επομένως μπορεί να εφαρμόζεται η απλή διαδικασία.

3. Η ΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

3.1. Εξωτερική πίεση

Η πίεση του ανέμου πάνω στην εξωτερική επιφάνεια μίας κατασκευής, w_e , υπολογίζεται από τη σχέση: $w_e = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_{pe}$ (1)
όπου q_{ref} είναι η πίεση αναφοράς, $c_e(z_e)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης και c_{pe} είναι αεροδυναμικός συντελεστής, όπως ορίζονται στα επόμενα.

3.2. Εσωτερική πίεση

Η πίεση του ανέμου πάνω στην εξωτερική επιφάνεια μίας κατασκευής, w_i , υπολογίζεται από τη σχέση: $w_i = q_{ref} \cdot c_e(z_i) \cdot c_{pi}$ (2)
όπου $c_e(z_i)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης, ανάλογος του $c_e(z_e)$, c_{pi} είναι αεροδυναμικός συντελεστής.

4. Ο ΑΝΕΜΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

4.1. Η πίεση αναφοράς του ανέμου.

Η πίεση αναφοράς του ανέμου q_{ref} σε N/m^2 , υπολογίζεται από τη σχέση

$$q_{ref} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{ref}^2 \quad (3)$$

όπου V_{ref} είναι η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου σε m/sec και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα kg/m^3 . Η πυκνότητα του αέρα επηρεάζεται από το υψόμετρο και εξαρτάται από την θερμοκρασία και την αναμενόμενη βαρομετρική πίεση στην περιοχή κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Η τιμή του ρ παίρνεται ίση με $1,25 kg/m^3$.

4.2. Η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου.

Η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, V_{ref} , ορίζεται ως η μέση ταχύτητα δεκαλέπτου, σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους κατηγορίας II και η οποία έχει μέση περίοδο επανεμφάνισης 50 έτη (συχνότητα επανεμφάνισης 2%).

Υπολογίζεται από την σχέση: $V_{ref} = c_{DIR} \cdot c_{TEM} \cdot c_{ALT} \cdot V_{ref,0}$ (4)

όπου $V_{ref,0}$ είναι η βασική ταχύτητα αναφοράς του ανέμου ή οποία, όπως ορίζεται στο παράρτημα Α του μέρους 2-4 του Ευρωκώδικα 1 είναι:

• Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες, που απέχουν μέχρι 10 Km από τη θάλασσα: $V_{ref,0} = 36 m/sec$. • Για το εσωτερικό της χώρας: $V_{ref,0} = 30 m/sec$.

c_{DIR} είναι συντελεστής διεθύνσεως, c_{TEM} είναι συντελεστής προσωρινότητας και c_{ALT} είναι συντελεστής υψόμετρου. Σύμφωνα με τον EC1 για την Ελλάδα είναι $c_{DIR} = c_{TEM} = c_{ALT} = 1,0$. Επομένως η πίεση αναφοράς του ανέμου είναι:

• Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες: $q_{ref} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{ref}^2 = 810 N/m^2$ (5)

• Για το εσωτερικό της χώρας: $q_{ref} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{ref}^2 = 562,5 N/m^2$ (6)

Η ταχύτητα αναφοράς $V_{ref}(p)$ για συχνότητα επανεμφάνισης, p , διάφορη της τιμής 0,02 μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$V_{ref}(p) = V_{ref} \left[\frac{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(1-0,02)]} \right]^n \quad (7)$$

όπου V_{ref} είναι η ταχύτητα αναφοράς για συχνότητα επανεμφάνισης ίση με 2%, K_1 είναι παράμετρος σχήματος και n είναι εκθέτης. Για την Ελλάδα χρησιμοποιούνται οι αντιπροσωπευτικές τιμές $K_1 = 0,2$ και $n = 0,5$, τις οποίες αν βάλουμε στην (7) έχουμε

$$V_{ref}(p) = V_{ref} \left[\frac{1 - 0,2 \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - 0,2 \cdot \ln[-\ln(1-0,02)]} \right]^{0,5} = \frac{V_{ref}}{1,3343} [1 - 0,2 \cdot \ln[-\ln(1-p)]]^{0,5} \quad (8)$$

Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης των φορτίων σε αντιστοιχία με την περίοδο επανεμφάνισης και τη διάρκεια ζωής του έργου, υπολογίζεται από την σχέση

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^N \quad (9)$$

όπου T είναι η περίοδος επανεμφάνισης του συμβάντος σε έτη και N είναι η διάρκεια ζωής του έργου σε έτη.

5. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΘΕΣΕΩΣ

5.1. Γενικά

Με τον συντελεστή εκθέσεως, $c_e(z)$, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους του αναγλύφου και του ύψους από το έδαφος, στην μέση ταχύτητα του ανέμου και στην τύρβη.

$$\text{Ορίζεται από την σχέση } c_e(z) = (c_r(z))^2 \cdot c_t^2 \cdot [1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z)] \quad (10)$$

όπου g είναι συντελεστής αιχμής (ανεμορριπής) ο οποίος παίρνεται ίσος με 3,5, $c_r(z)$ είναι συντελεστής τραχύτητας, c_t είναι συντελεστής αναγλύφου και $I_v(z)$ είναι η

$$\text{ένταση της τύρβης, η οποία ορίζεται από την σχέση } I_v(z) = \frac{K_T}{c_r(z) \cdot c_t}.$$

5.2. Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$.

Ο συντελεστής τραχύτητας σε ύψος z_e καθορίζεται από λογαριθμική κατατομή:

$$c_r(z_e) = K_T \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \text{ για } z_{\min} \leq z_e \leq 200 \text{ m και } c_r(z) = c_r(z_{\min}) \text{ για } z_e \leq z_{\min} \quad (11)$$

όπου K_T είναι συντελεστής εδάφους, z_0 είναι το μήκος τραχύτητας σε m, z_{\min} είναι ελάχιστο ύψος σε m και z_e είναι το ύψος αναφοράς του θερμοκηπίου σε m. Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα μπορούν να θεωρησουμε γενικά ότι κατασκευάζονται σε αγροτικές εκτάσεις χωρίς περιφράξεις, με σποραδικά κτίρια και δένδρα. Τα εδάφη αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία II και έχουν $K_T = 0,19$, $z_0 = 0,05$ m και $z_{\min} = 4$ m. Επο-

$$\text{μένως ο συντελεστής τραχύτητας είναι } c_r(z_e) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{z_e}{0,05}\right) = 0,19 \ln z_e + 0,569 \quad (12)$$

5.3 Ο συντελεστής αναγλύφου c_t

Λαμβάνεται υπόψη για περιοχές πλησιέστερα από το μισό του μήκους της πλαγιάς από την κορυφή ή 1,5 φορές το ύψος του γκρεμού. Ορίζεται από τις σχέσεις (i) $c_t = 1$ για $\Phi < 0,05$ (ii) $c_t = 1 + 2 \cdot s \cdot \Phi$ για $0,05 < \Phi < 0,30$ (iii) $c_t = 1 + 0,6 \cdot s$ για $\Phi > 0,30$ (13) Από τα διαγράμματα 8.1 και 8.2 του μέρους 2-4 του EC1, δημιουργήσαμε τους επόμενους δύο πίνακες από τους οποίους υπολογίζουμε την τιμή του c_t . Στους πίνακες αυτών, Φ είναι η κλίση της ανάντι πλαγιάς, Φ' είναι η κλίση της κατάντι πλαγιάς, h είναι η κατακόρυφη απόσταση της κατασκευής από την κορυφή, H είναι το ύψος της εδαφικής ανωμαλίας και X είναι η οριζόντια απόσταση της κατασκευής από την κορυφή.

Πίνακας 2. Τιμές συντελεστή c_t για γκρεμούς και εξάρσεις.

Φ	Προσήνεμη πλευρά							X/H	Υπίνεμη πλευρά		
	h/H								Φ		
	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0		0,10	0,20	0,30
0,05	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,08	0,0	1,16	1,28	1,33
0,10	1,06	1,08	1,10	1,12	1,14	1,15	1,16	0,5	1,17	1,29	1,35
0,20	1,12	1,15	1,18	1,22	1,25	1,26	1,28	1,0	1,16	1,28	1,36
0,30	1,15	1,19	1,22	1,26	1,29	1,31	1,33	2,0	1,15	1,27	1,36
0,40	1,24	1,26	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33	5,0	1,11	1,21	1,30
0,50	1,30	1,31	1,31	1,32	1,32	1,33	1,33	10,0	1,07	1,12	1,03
$\geq 0,55$	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	15,0	1,06	1,01	1
								$\geq 17,0$	1	1	1

Πίνακας 3. Τιμές συντελεστή c_t για λόφους και προεξοχές .

Προσήνεμη πλευρά								Υπήνεμη πλευρά					
Φ	h/H							Φ	Φ'	h/H			
	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0			0,50	0,25	0	
0,05	1,03	1,04	1,05	1,07	1,08	1,08	1,09	0,1	0,10	1,03	1,10	1,18	
0,10	1,06	1,08	1,11	1,13	1,16	1,17	1,18			0,20	1,07	1,13	1,18
0,20	1,12	1,15	1,18	1,20	1,23	1,25	1,26			0,30	1,10	1,14	1,18
0,30	1,15	1,18	1,21	1,24	1,27	1,29	1,31	0,2	0,10	1,03	1,15	1,26	
0,40	1,24	1,24	1,25	1,25	1,26	1,26	1,26			0,20	1,07	1,17	1,26
0,50	1,30	1,28	1,26	1,24	1,21	1,2	1,19			0,30	1,12	1,19	1,26
0,60	1,33	1,30	1,26	1,23	1,20	1,18	1,16	0,3	0,10	1,06	1,19	1,31	
0,80	1,33	1,29	1,24	1,20	1,16	1,14	1,11			0,20	1,14	1,22	1,31
1,00	1,33	1,28	1,23	1,19	1,14	1,11	1,09			0,30	1,24	1,28	1,31

5.4. Ο συντελεστής εκθέσεως $c_e(z_e)$.

Για την περίπτωση των θερμοκηπίων , αν λάβουμε υπόψη τις αναλύσεις που έγιναν παραπάνω , έχουμε

$$c_e(z_e) = (c_r(z_e))^2 \cdot c_t^2 \cdot [1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z_e)] = c_r(z_e) \cdot c_t \cdot [c_r(z_e) \cdot c_t + 1,33] \quad (14)$$

Για επίπεδα εδάφη και εδάφη με κλίσεις $\Phi < 5\%$ για τα οποία είναι $c_t = 1$, ο συντελεστής εκθέσεως $c_e(z_e)$, δίνεται από τη σχέση $c_e(z_e) = c_r(z_e) \cdot [c_r(z_e) + 1,33]$ (15)

6. ΟΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

6.1 Ύψος αναφοράς

Το ύψος αναφοράς , z_e , των θερμοκηπίων , είναι το ύψος από το επίπεδο του εδάφους μέχρι το ύψος της κορυφιάς οριζόντιας δοκού οροφής (κορυφιάς) .

6.2. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης

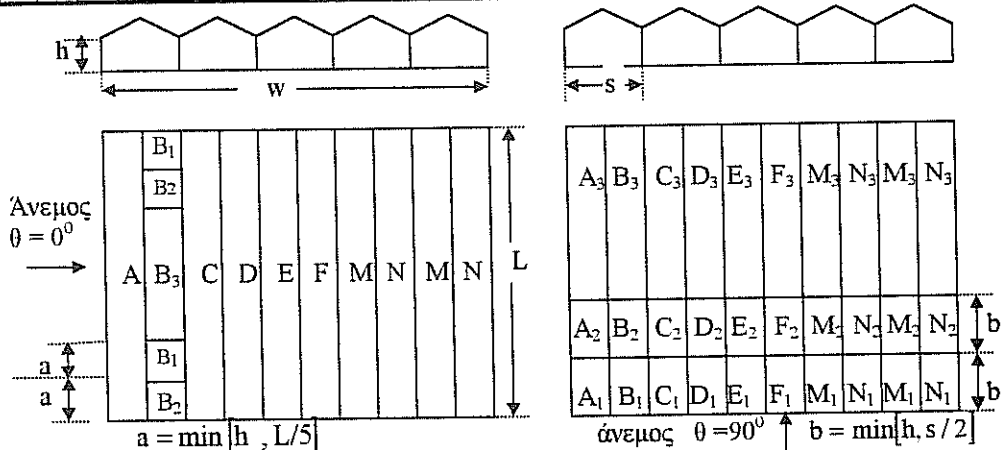
6.2.1. Οροφές θερμοκηπίων

6.2.1.1. Αμφικλινή θερμοκήπια

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} , δίνονται στον πίνακα 4. Ειδικά για τις προσήνεμες πλευρές με γωνία κλίσεως $20^\circ \leq \phi \leq 26^\circ$, δίνονται στον πίνακα 5.

Α. Διεύθυνση ανέμου θ^0										
Θερμοκήπια ενός ανοιγματος										
h/s	A	B			C	D	E	F	M	N
		B1	B2	B3						
$\leq 0,4$	Πίν. 5	-0,6	-1,0	-0,8						
$\geq 0,4$	Πίν. 5	-0,8	-1,0	-0,8						
Θερμοκήπια πολλαπλών ανοιγμάτων										
h/s	A	B			C	D	E	F	M	N
		B1	B2	B3						
$\leq 0,3$	Πίν. 5			-0,5	-0,5	-0,5	-0,4 (3 x)	-0,5 (3 x)	-0,4	-0,4
0,4	Πίν. 5	-1,0	-0,8	-1,2	-1,1	-0,5	-0,4 (4 x)	-0,5 (4 x)	-0,4	-0,4
$\geq 0,7$	Πίν. 5			-1,0	-0,7	-0,5	-0,4 (7 x)	-0,5 (7 x)	-0,4	-0,4

B. Διεύθυνση ανέμου 90°																							
Θερμοκήπια ενός ανοίγματος																							
A			B																				
A1	A2	A3	B1	B2	B3																		
-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2																		
Θερμοκήπια πολλαπλών ανοιγμάτων																							
A			B			C			D			E			F			M			N		
A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2	-1,2	-0,5	-0,2



Πίνακας 4. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} για αμφικλινείς οροφές θερμοκηπίων.

Πίνακας 5. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} για τις προσήνεμες οροφές αμφικλι-
νών θερμοκηπίων με γωνία κλίσεως $20^\circ \leq \varphi \leq 26^\circ$.

h/s	c_{pe}						
	$\varphi=20^\circ$	$\varphi=21^\circ$	$\varphi=22^\circ$	$\varphi=23^\circ$	$\varphi=24^\circ$	$\varphi=25^\circ$	$\varphi=26^\circ$
0,20	-0,25	-0,15	-0,06	0,05	0,15	0,25	0,362
0,30	-0,48	-0,38	-0,29	-0,18	-0,08	0,02	0,135
0,40	-0,71	-0,60	-0,52	-0,42	-0,31	-0,21	-0,09
0,50	-0,93	-0,83	-0,75	-0,65	-0,54	-0,44	-0,32
0,60			-0,98	-0,88	-0,77	-0,67	-0,54
0,70	-1,07	-1,06		-1,04	-1,01	-0,9	-0,77
0,80			-1,05		-1,03	-1,02	-0,95

• Επειδή για διεύθυνση ανέμου $\theta = 0^\circ$ και κλίση της οροφής $15^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, η πίεση στην προσήνεμη πλευρά αλλάζει απότομα μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης για $\varphi = 15^\circ$ παίρνει και την τιμή $c_{pe} = +0,2$ και για $\varphi = 30^\circ$ παίρνει και την τιμή $c_{pe} = +0,7$. Για ενδιάμεσες τιμές γίνεται γραμμική παρεμβολή. Ο έλεγχος της προσήνεμης πλευράς θα γίνεται και για τις δύο περιπτώσεις φορτίσεως. Για γωνίες, $\varphi \geq 30^\circ$ για την προσήνεμη πλευρά έχομε $c_{pe} = +0,7$ ενώ για τις υπόλοιπες πλευρές ισχύουν οι τιμές του πίνακα 4. • Για θερμοκήπια με περισσότερα από πέντε ανοίγματα, οι συντελεστές πίεσης για τις όψεις των οροφών E και F είναι δυνατό να επαναλαμβάνονται στις επιπλέον όψεις για τόσες φορές, όσες αναφέρονται στον πίνακα (π.χ. το -0,4 (3 x) σημαίνει ότι ο συντελεστής -0,4 μπορεί να εφαρμοστεί για τρία επιπλέον συνεχόμενα ανοίγματα) και στην συνέχεια εφαρμόζονται οι συντελεστές των όψεων M και N.

6.2.1.2. Θερμοκλίμα με τοξωτές οροφές

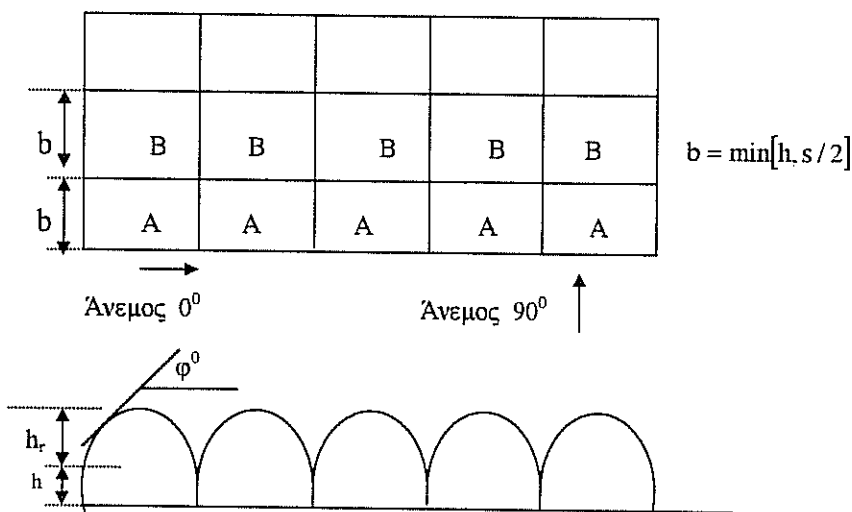
6.2.1.2.1. Τοξωτά θερμοκλίμα χωρίς κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες.

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} , για τις τοξωτές οροφές θερμοκλιμάτων πολλαπλών ανοιγμάτων χωρίς κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες, δίδονται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} , για τις τοξωτές οροφές θερμοκλιμάτων πολλαπλών ανοιγμάτων χωρίς κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες

Διεύθυνση ανέμου	Άνοιγμα	φ		c_{pe}	c_{pe}^{**}	A	B
		Απλά	Πολλαπλά				
0°	Πρώτο	90° έως 55°	90° έως 55°	+ 0,4	+ 0,4		
		55° έως 35°	55° έως 35°	- 0,1	- 0,1		
		35° έως 15°	35° έως 15°	- 0,8	- 1,1		
		15° έως -5°	15° έως -5°	- 1,3	- 1,8		
		-5° έως -25°	-5° έως -15°	- 0,6	- 0,9		
	Δεύτερο	-25° έως -90°	15° έως υδρορρόη	- 0,3	- 0,3		
		υδρορρόη έως 5°		- 0,3	- 0,3		
		5° έως -10°	- 0,9	- 1,0			
	Τρίτο και επόμενα	-10° έως 90°		- 0,2	- 0,2		
		υδρορρόη έως 5°		- 0,1	- 0,1		
5° έως -10°		- 0,7	- 0,8				
Υπήνεμο *	-10° έως 90°		- 0,1	- 0,1			
	υδρορρόη έως 5°		- 0,0	- 0,0			
90°	Όλα	5° έως -10°	- 0,6	- 0,6			
		-10° έως υδρορρόη	- 0,2	- 0,2			
		90° έως - 90°	- 0,3	- 0,3	- 1,3	- 0,6	

• * Για δύο όμοια ανοίγματα χρησιμοποιούμε τους συντελεστές που ισχύουν για το δεύτερο άνοιγμα με την διαφοροποίηση ότι για -10° έως 90° ο συντελεστής παίρνει τιμή -0,4. • Για τρία ανοίγματα χρησιμοποιούμε τους συντελεστές που ισχύουν για το δεύτερο άνοιγμα με την διαφοροποίηση ότι για -10° έως 90° ο συντελεστής παίρνει τιμή -0,4. • ** Οι τιμές αυτές ισχύουν για $h_r/s < 0,35$ και επικάλυψη πλαστικό φύλλο το οποίο δεν συγκρατείται από την αποκόλληση πάνω από τον κορφιά.



6.2.1.2.2. Τοξωτά θερμοκήπια με κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} , για $h/s \geq 0,2$ δίδονται στον πίνακα 7. Για $h/s < 0,2$, αντιμετωπίζονται ως θερμοκήπια χωρίς κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες.
Πίνακας 7. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} , για τις τοξωτές οροφές θερμοκηπίων με κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες.

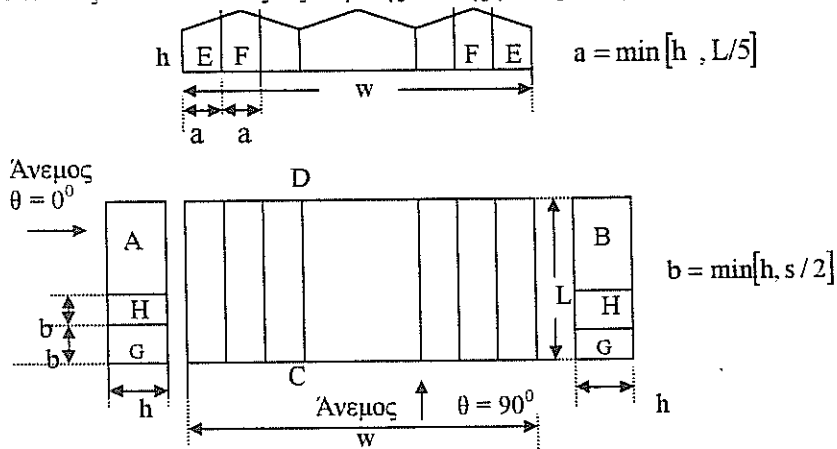
Διεύθυνση ανέμου	Άνοιγμα	φ		c_{pe}	c_{pe}^{**}	A	B
		Απλά	Πολλαπλά				
0°	Πρώτο	υδρορρόφη έως 55°	υδρορρόφη έως 55°	+ 0,3	+ 0,3		
		55° έως 35°	55° έως 35°	- 1,0	- 1,0		
		35° έως -25°	35° έως -10°	- 1,0	- 1,2		
		-25° έως υδρορρόφη	-10° έως υδρορρόφη	- 0,4/ - 0,3	- 0,4/ - 0,3		
0°	Δεύτερο	υδρορρόφη έως 10°		- 0,3	- 0,3		
		10° έως -10°		- 0,9	- 1,0		
		-10° έως υδρορρόφη		- 0,2	- 0,2		
0°	Τρίτο και επόμενα	υδρορρόφη έως 10°		Είναι το 0,6 του συντελεστή που ισχύει για το δεύτερο άνοιγμα			
		10° έως -10°					
		-10° έως υδρορρόφη					
90°	Όλα	90° έως - 90°		- 0,3	- 0,3	- 1,3	- 0,6

** Οι τιμές αυτές ισχύουν για $h_r / s < 0,35$ και επικάλυψη πλαστικό φύλλο το οποίο δεν συγκρατείται από την αποκόλληση πάνω από τον κορφιά.

6.2.2. Πλευρικές επιφάνειες θερμοκηπίων

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για τις πλευρικές επιφάνειες των αμφικλινών θερμοκηπίων, εξαρτώνται από το λόγο h/w και δίνονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8. Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για τις πλευρικές επιφάνειες θερμοκηπίων



Διεύθυνση ανέμου	h/w	A	B	C	D	E	F	G	H
0°	$\leq 0,4$	+ 0,6	- 0,3	- 0,3	- 0,3	- 1,0	- 0,6	-	-
	$\geq 0,4$	+ 0,6	- 0,6	- 0,4	- 0,4	- 1,0	- 0,6	-	-
90°	$\leq 0,4$	- 0,2	- 0,2	+ 0,7	- 0,3	-	-	- 0,8	- 0,5
	$\geq 0,4$	- 0,2	- 0,2	+ 0,7	- 0,3	-	-	- 1,0	- 0,6

6.3. Συντελεστές εσωτερικής πίεσης .

Οι συντελεστές εσωτερικής πίεσης c_{pi} , για αμφικλινή και για τοξωτά θερμοκήπια, δίνονται στον πίνακα 9. Ο υπολογισμός θα επαναλαμβάνεται για την θετική και την αρνητική εσωτερική πίεση. Εάν στην προσήνεμη πλευρά έχουμε μεγάλα ανοίγματα , πρέπει να εφαρμόσουμε συντελεστή εσωτερικής πίεσης $c_{pi} = + 0,6$.

Πίνακας 9. Συντελεστές εσωτερικής πίεσης c_{pi} .

Τύπος θερμοκηπίου	Διεύθυνση ανέμου 0°		Διεύθυνση ανέμου 90°	
	αμφικλινή	τοξωτά *	αμφικλινή	τοξωτά
Ένα άνοιγμα	+ 0,2 και -0,4	+ 0,2 και - 0,4	+ 0,2 και -0,2	+ 0,2 και - 0,1
Πολλαπλά ανοίγματα	+ 0,2 και -0,3	+ 0,2 και - 0,3	+ 0,2 και -0,2	+ 0,2 και - 0,2

• * Ισχύουν για θερμοκήπια με κλειστά ανοίγματα , με πόρτες στους ακραίους τοίχους, αλλά αδιαπέρατες πλευρές. • Για θερμοκήπια με διαπερατές ή ανοιχτές πλευρές οι αρνητικοί συντελεστές είναι $- 0,2$ και $0,0$.

6.4. Συντελεστής τριβής.

Οι δυνάμεις τριβής λόγω του ανέμου, θα υπολογίζονται για τις επιφάνειες των όψεων των πλευρικών τοίχων που είναι διατεταγμένοι παράλληλα στον άνεμο, καθώς επίσης για τις επιφάνειες των όψεων της οροφής αλλά μόνο για την περίπτωση πνοής του ανέμου με διεύθυνση 90° . Υπολογίζονται χρησιμοποιώντας συντελεστή τριβής $c_{F} = 0,01$.

6.5. Ανεμιστήρες

Τα θερμοκήπια πρέπει να σχεδιάζονται για φορτία ανέμου που αντιστοιχούν σε κλειστούς ανεμιστήρες. Όταν εφαρμόζεται η πίεση λόγω λειτουργίας των ανεμιστήρων , δεν θα εφαρμόζεται άλλη ανεμοπίεση. Ο καθαρός συντελεστής πίεσης $c_{p,net}$ για ανοιχτούς ανεμιστήρες πρέπει να παίρνεται ίσος με $c_{p,net} = +1,25$ και $c_{p,net} = - 1,25$. και θα εφαρμόζεται σε όλες τις πλευρές του θερμοκηπίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures - Part 1 : Basis of design, CEN, ENV 1991-1, September 1994.
2. Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures - Part 2-4 Actions on structures - Wind actions, CEN, ENV 1991-2-4, May 1995.
3. CEN : Draft prEN 13031-1 . Greenhouses : Design and construction - Part 1: Commercial production Greenhouses. 1997.
4. National Greenhouse manufactures association (NGMA) , Standards for design loads in greenhouse structures , 1997.
5. Γεωργίου Ν. Μαυρογιαννόπουλου , Θερμοκήπια , 1994.
6. Iabse Colloquium, Basis of Design and Actions on Structures Background and application of Eurocode 1, Volume 74, Delft 1996.
7. Vassiliou , N.N., Nikita - Martzopoulou ,C., “ Estimation of dynamic wind pressure for greenhouse structural design ” , Acta Horticulture , Nr 281 , 1990.