

8^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΒΑΣΕΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ιωάννης Ι. Βογιατζής^{1,2}, Βασίλειος Π. Φράγκος¹, Γεώργιος Κ. Ντίνας^{1,3}, Γεράσιμος Γ. Μαρτζόπουλος¹

¹Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη

²Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη

³INRA, UMR INRA - AGROPARISTECH Environment & Arable Crops, 78850, Thiverval-Grignon, France

Οι μικρής-κλίμακας ανεμογεννήτριες ανήκουν στα χαμηλού κόστους συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και θεωρείται ότι θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις ενεργειακές ανάγκες των αγροτικών εγκαταστάσεων. Κατά συνέπεια, το πεδίο ροής αέρα γύρω από τις αγροτικές κατασκευές παίζει κρίσιμο ρόλο στην επιλογή της βέλτιστης θέσης και της τελικής ενεργειακής απόδοσης των ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση της τύρβης σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια αριθμητική προσομοίωση των χαρακτηριστικών της δισδιάστατης (2D) ροής αέρα γύρω από μια συγκεκριμένη γεωμετρική κατασκευή, σε ένα επίπεδο εγκάρσια στον άξονα της, υπολογίζοντας τα στιγμιαία μεγέθη της ροής με την άμεση επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων Galerkin. Το μέτρο και η διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου λαμβάνονται σταθερά. Τα αποτελέσματα δείχνουν πώς τα χαρακτηριστικά της ροής αέρα εξαρτώνται έντονα από το γεωμετρικό προφίλ της κατασκευής και εξάγονται συμπεράσματα αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον τύπο και τη θέση εγκατάστασής της.

Λέξεις κλειδιά: άμεση αριθμητική προσομοίωση, ανανεώσιμη ενέργεια, μικρές ανεμογεννήτριες, αγροτικές κατασκευές

EFFECT OF RURAL CONSTRUCTION GEOMETRY IN SELECTING THE LOCATION FOR SMALL WIND TURBINE ON THE BASIS OF TWO DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL

Ioannis I. Vogiatzis^{1,2}, Vasileios P. Fragos¹, Georgios K. Ntinis^{1,3}, Gerasimos G. Martzopoulos¹

¹Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki

²Department of Electrical and Computer Engineering, Polytechnic School, Democritus University of Thrace, 67100, Xanthi

³INRA, UMR INRA - AGROPARISTECH Environment & Arable Crops, 78850, Thiverval-Grignon, France
ivogiatz@gmail.com, fragos@agro.auth.gr, georgiosntinas@gmail.com, martzopo@agro.auth.gr

Micro-wind turbines are low cost renewable energy devices that could meet the energy needs of agricultural constructions. Thus, the wind flow field around the constructions taking into account the wind speed and turbulence intensity fields in a given location plays a crucial role in the optimum placement selection and final energy yield of the wind turbines. This paper presents a numerical study of the characteristics of a two-dimensional (2D) wind flow around a specific geometric construction estimating the transient flow magnitudes by solving directly the Navier-Stokes and continuity equations, using the Galerkin finite element method. The modulus and direction of the wind velocity at the entrance of the computational domain are taken to be constant. Results show how the wind flow characteristics are strongly dependent on the geometrical profile of the construction and conclusions are drawn regarding the energy yield being dependent both on the position and the type of wind turbine used.

Keywords: direct numerical simulation, renewable energy, small wind turbines, rural constructions

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, η αιολική ενέργεια βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή. Αυτό επιτυγχάνεται με τις ανεμογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν αρχικά την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική και στη συνέχεια τη μηχανική σε ηλεκτρική.

Εκτός από τα αιολικά πάρκα που αποτελούνται από συστοιχίες πολλών, μεγάλων ανεμογεννητριών (800kW – 6MW) και τροφοδοτούν απευθείας το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να γίνει εγκατάσταση και μικρών ανεμογεννητριών για εφαρμογές μικρής κλίμακας, κυρίως για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απομονωμένων

καταναλωτών, όπως είναι π.χ. των αγροτικών κατασκευών.

Η χρήση μικρών ανεμογεννητριών (400W μέχρι 10kW) συνιστάται σε μη αστικές περιοχές. Η εγκατάστασή τους απαιτεί μια ελεύθερη έκταση γύρω από αυτές, χωρίς εμπόδια που να επηρεάζουν την έκθεσή τους στον άνεμο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αποδοτική λειτουργία τους.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε κάθετου (Vertical Axis Wind Turbines, VAWT) και οριζόντιου (Horizontal Axis Wind Turbines, HAWT) άξονα ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής τους, με τις δεύτερες να είναι οι πιο συνηθισμένες (Shikha Bhatti and Kothari, 2005). Η

κύρια διαφορά τους είναι ότι οι κάθετου άξονα έχουν την ικανότητα να δέχονται τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση, γι' αυτό ονομάζονται και γυροσκοπικές (omni-directional). Αυτό έχει μερικά πλεονεκτήματα, όπως η μη απαίτηση συστήματος αλλαγής προσανατολισμού το οποίο αυξάνει το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης. Επιπλέον, οι γυροσκοπικές ανεμογεννήτριες δεν παρουσιάζουν απώλειες ισχύος κατά τη διάρκεια της αλλαγής της διεύθυνσης του ανέμου ή κατά τη διάρκεια βραχέων ριπών του ανέμου οι οποίες συνοδεύονται από αλλαγές στη διεύθυνσή του (Roynarin et al., 2002). Συνεπώς, μια γυροσκοπική ανεμογεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί σε μέρος όπου η ροή του ανέμου είναι τυρβώδης και η διεύθυνσή της αλλάζει συνεχώς. Γι' αυτό το λόγο η κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες πλεονεκτούν σε σχέση με τις οριζοντίου άξονα σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου, σε περιοχές με πολύ ισχυρούς ή θυελλώδεις ανέμους και σε αστικές περιοχές (Riegler, 2003). Έρευνες έχουν δείξει σαφές πλεονέκτημα των VAWTs στις στέγες (Mertens, 2003). Επιπρόσθετα, οι κάθετου άξονα είναι λιγότερο θορυβώδεις και ως εκ τούτου είναι καταλληλότερες για εγκατάσταση σε αστικές περιοχές (Riegler, 2003).

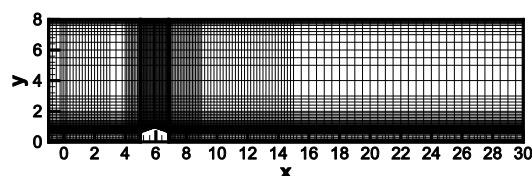
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι το είδος της ροής του ανέμου, αν είναι τυρβώδης ή στρωτή, καθώς επίσης και η ταχύτητα και κατ' επέκταση η κινητική του ενέργεια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην απόδοση μιας μικρής ανεμογεννήτριας ανεξάρτητα του τύπου της. Κατά συνέπεια, η "χαρτογράφηση" μιας περιοχής όσο αφορά το αιολικό δυναμικό της και πώς αυτό επηρεάζεται από τα φυσικά ή/και τα τεχνητά εμπόδια, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βέλτιστη επιλογή της θέσης μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο έχει μελετηθεί από έναν αριθμό εργασιών θεωρητικά, πειραματικά και υπολογιστικά (Mertens, 2003; Heath et al., 2007; Watson et al., 2007; Sunderland and Conlon, 2010; Ledo et al., 2011; Milanese et al., 2011; Ntinis et al., 2011; Walker, 2011; Ayhan and Saglam, 2012; Abohela et al., 2013).

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης σε κώδικα Fortran (Fragos et al., 2007, 2012) η δισδιάστατη ροή ανέμου γύρω από μια αμφίρρικτη κατασκευή. Για την αποτίμηση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μιας μικρής ανεμογεννήτριας και την αποφυγή των περιοχών τυρβώδους ροής υπολογίστηκαν, για όλο το υπολογιστικό πεδίο, οι τυρβώδεις εντάσεις της οριζόντιας και κάθετης ροής του ανέμου, η τυρβώδης κινητική ενέργεια καθώς και η συνισταμένη μέση ταχύτητα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα εργασία ο άνεμος θεωρείται ότι είναι ασυμπίεστο ρευστό σταθερού ιξώδους και πυκνότητας. Για την επίλυση του συστήματος των αδιάστατων μη-γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξισώσεις Navier-Stokes και συνέχειας), που περιγράφουν την κίνηση αυτού του ρευστού

χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων Galerkin (Gresho and Sani, 2000; Zienkiewicz et al., 2005). Ως οριακή συνθήκη ανάντη της εισόδου του υπολογιστικού πεδίου τίθεται οριζόντια ομοιόμορφη ελεύθερη ροή ρευστού. Στα τοιχώματα του υπολογιστικού πεδίου και γύρω από την επιφάνεια της αμφίρρικτης κατασκευής τίθενται συνθήκες μη ολισθήσεως όπου το ρευστό έχει μηδενική ταχύτητα. Η οριακή συνθήκη εξόδου είναι ελεύθερη με αποτέλεσμα το ρευστό να εξέρχεται του υπολογιστικού πεδίου χωρίς να υπόκειται σε διαταραχή. Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τη δισδιάστατη προσομοίωση της ροής του ανέμου κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της αμφίρρικτης κατασκευής.

Για τον υπολογισμό των μέσων τιμών χρησιμοποιήθηκε η σχέση,

$$\langle X \rangle = \frac{1}{T_n} \int_0^t X dt$$

με τις στιγμιαίες μεταβλητές της ροής, X , να έχουν ληφθεί από την άμεση επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας,

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

και

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

όπου χρησιμοποιήθηκε ταυυστικός συμβολισμός ενώ τα i, j είναι πλασματικοί δείκτες οι οποίοι λαμβάνουν τιμές 1, 2 οι οποίες αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις συντεταγμένες x, y . U_i είναι οι στιγμιαίες συνιστώσες του διανύσματος ταχύτητας, P είναι η πίεση και Re είναι ο αριθμός Reynolds. T_n είναι ο συνολικός χρόνος, ο οποίος για τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 150 αδιάστατες χρονικές μονάδες. Η τυρβώδης οριζόντια ταχύτητα U'_1 και η αντίστοιχη εγκάρσια ταχύτητα U'_2 υπολογίζονται αναλύοντας τις στιγμιαίες ταχύτητες σε αθροίσματα μέσων και διακυμαινόμενων ταχυτήτων,

$$U'_1 = U_1 - \langle U_1 \rangle$$

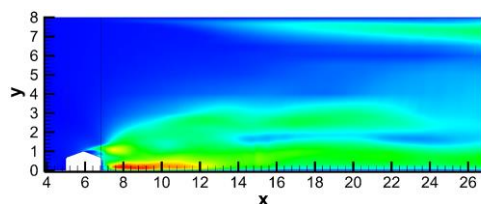
$$U'_2 = U_2 - \langle U_2 \rangle$$

Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για $Re = 1000$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

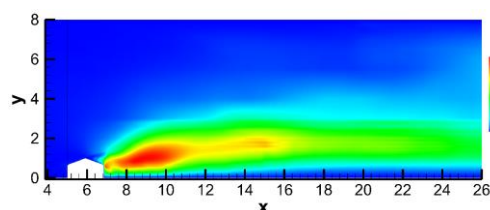
3.1. Τυρβώδεις εντάσεις

Τα μεγέθη της οριζόντιας και κάθετης τυρβώδους έντασης, $\sqrt{\langle U_1'^2 \rangle}$ και $\sqrt{\langle U_2'^2 \rangle}$ φαίνονται στις Εικόνες 2 και 3, αντίστοιχα, χρωματικά κωδικοποιημένα. Η οριζόντια τυρβώδης ένταση μεγιστοποιείται κατάντη της κατασκευής κοντά στο επίπεδο της βάσης έχοντας ένα εύρος 2.5 περίπου φορές το πλάτος της κατασκευής.



Εικόνα 2. Χρωματική απεικόνιση της οριζόντιας τυρβώδους έντασης.

Όμοια προς την παράλληλη, η εγκάρσια τυρβώδης ένταση επίσης μεγιστοποιείται κατάντη της κατασκευής, ωστόσο, οι μέγιστες τιμές της καταλαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετη διεύθυνση.



Εικόνα 3. Χρωματική απεικόνιση της εγκάρσιας τυρβώδους έντασης.

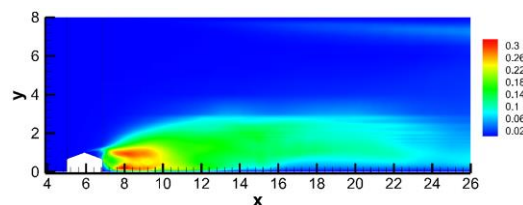
Από την Εικόνα 3 είναι φανερό ότι το εύρος αυτής της έκτασης είναι 4.5 περίπου φορές το πλάτος της κατασκευής κατά την οριζόντια διεύθυνση και 1.5 περίπου φορές το ύψος της κατασκευής κατά την κάθετη διεύθυνση.

3.2. Τυρβώδης κινητική ενέργεια

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (TKE) δίνεται από τη σχέση,

$$k = \frac{1}{2} (\langle U_1'^2 \rangle + \langle U_2'^2 \rangle)$$

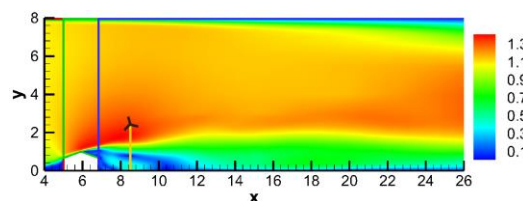
και είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις μετρούμενες τυρβώδεις εντάσεις. Κατά συνέπεια, όπως είναι φανερό στην Εικόνα 4, η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι ουσιαστικά η υπέρθεση των Εικόνων 2 και 3.



Εικόνα 4. Χρωματική απεικόνιση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

3.3. Πεδίο συνιστάμενης μέσης ταχύτητας

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τη συνιστάμενη μέση οριζόντια και κάθετη ταχύτητα. Όπως είναι φανερό, κατάντη της κατασκευής όπου έχουμε μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις και επομένως ισχυρή τύρβη η συνιστάμενη μέση ταχύτητα ροής η οποία χαρακτηρίζει τη στρωτή ροή, λαμβάνει τις μικρότερες τιμές. Αντίθετα, μέγιστες τιμές παρατηρούνται σε σημεία σχετικά απομακρυσμένα από την οροφή της αμφίρρικτης κατασκευής.



Εικόνα 5. Χρωματική απεικόνιση της συνιστάμενης μέσης ταχύτητας $\sqrt{\langle U_1 \rangle^2 + \langle U_2 \rangle^2}$.

3.4. Κατανομές συχνότητας-ταχύτητας

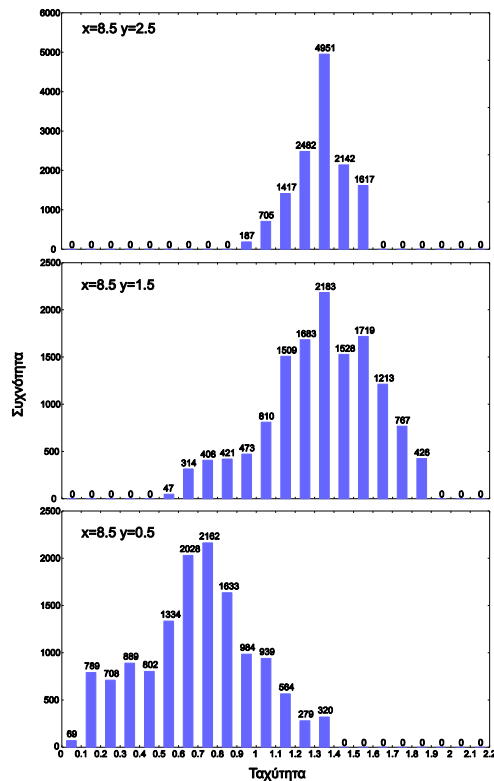
Για τη βέλτιστη επιλογή της θέσης της μικρής ανεμογεννήτριας, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού και η μέγιστη δυνατή λειτουργική διάρκεια του χρησιμοποιούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού, θα πρέπει να ικανοποιούνται δύο σημαντικά κριτήρια: (α) το σημείο έκθεσης της ανεμογεννήτριας να μην χαρακτηρίζεται από ισχυρές τυρβώδεις ροές στις οποίες οφείλεται η εμφάνιση ισχυρών μεταβαλλόμενων φορτίων που μπορούν να οδηγήσουν σε γήρανση του εξοπλισμού και (β) το συγκεκριμένο σημείο να έχει τη μεγαλύτερη, κατά το δυνατόν, συχνότητα εμφάνισης μέγιστων επιθυμητών ταχυτήτων στρωτής ροής ανέμου οι οποίες προσδιορίζουν και το ενεργειακό δυναμικό του.

Στο Διάγραμμα 1 φαίνονται οι κατανομές της συχνότητας εμφάνισης διαφόρων τιμών της στιγμιαίας συνιστάμενης ταχύτητας σε τρία διαφορετικά σημεία του υπολογιστικού πεδίου. Είναι φανερό ότι τα καταλληλότερα σημεία εγκατάστασης είναι τα $x=8.5, y=1.5$ και $x=8.5, y=2.5$. Συγκρίνοντας τις κατανομές των δύο αυτών σημείων παρατηρούμε ότι ενώ στη θέση $x=8.5, y=1.5$ καταγράφονται μεγαλύτερες στιγμιαίες ταχύτητες ανέμου U αυτή κρίνεται ως ακατάλληλη δεδομένου ότι βρίσκεται στο όριο της περιοχής όπου μεγιστοποιείται η τυρβώδης κινητική ενέργεια (βλ. Εικόνα 4). Εξετάζοντας τις Εικόνες 4 και 5 γίνεται κατανοητό ότι η θέση $x=8.5, y=2.5$ είναι η πλέον κατάλληλη εκ των τριών που

εξετάζουμε δεδομένου ότι βρίσκεται εκτός της περιοχής τυρβώδους ροής σε σημείο όπου η συνιστάμενη μέση ταχύτητα μεγιστοποιείται. Στην Εικόνα 5 φαίνεται σχηματικά η μικρή ανεμογεννήτρια για τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης $x=8.5$, $y=2.5$.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το ποσό της ισχύος, P , που μπορεί να απορροφηθεί από μία ανεμογεννήτρια υπολογίζεται από τη σχέση,



Διάγραμμα 1. Κατανομές της συχνότητας εμφάνισης διαφόρων τιμών της στιγμιαίας συνιστάμενης ταχύτητας σε τρία διαφορετικά σημεία του υπολογιστικού πεδίου.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3$$

όπου C_p είναι ο συντελεστής ισχύος, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, A είναι το εμβαδόν σάρωσης της ανεμογεννήτριας και v η ταχύτητα του ανέμου. Ο συντελεστής ισχύος αντιπροσωπεύει την αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας δίνοντας ένα μέτρο του πόση από την ισχύ του ανέμου μπορεί να απορροφηθεί από την ανεμογεννήτρια και είναι συνάρτηση του λόγου των ταχυτήτων, λ , στην άκρη των πτερυγίων,

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, R η ακτίνα της και v η ταχύτητα του ανέμου. Ο θεωρητικά μέγιστος συντελεστής

ισχύος καλείται όριο Betz και για μια ιδανική ανεμογεννήτρια έχει την τιμή 0.59 (Eriksson, 2008).

Κατά συνέπεια, η ταχύτητα του ανέμου και κατ' επέκταση η ποιότητα του αιολικού δυναμικού των υποψηφίων περιοχών εγκατάστασης (χαμηλά επίπεδα τυρβώδους ροής, μικρή συχνότητα εμφάνισης ριπών ανέμου, χαμηλές μέγιστες ταχύτητες ανέμου), αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την μακρόχρονη και παράλληλα αποδοτική λειτουργία μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Για την παρούσα μελέτη ενδεικτικά αναφέρουμε ότι αν η υπό εξέταση αμφίρρικτη κατασκευή έχει ύψος 4m και πλάτος 6m, τότε η βάση στήριξης της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να έχει ύψος γύρω στα $4 \times 2.5 = 10\text{m}$ και να είναι τοποθετημένη γύρω στα $6 \times (4.3/4.5) = 5.7\text{m}$ κατάντη της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη ότι στο υπολογιστικό πεδίο το ύψος και το πλάτος της κατασκευής ισούνται με 1 και 4.5 (αδιάστατες ποσότητες), αντίστοιχα. Σ' αυτό το ύψος εγκατάστασης και για εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό με μέση ταχύτητα ανέμου της τάξεως των 6.5m/sec, η οριζόντια ταχύτητα (η κάθετη λαμβάνεται ίση με μηδέν) στην είσοδο του υπολογιστικού μας πεδίου θα πρέπει να έχει μια τιμή γύρω στα $6.5/1.3 = 5\text{m/sec}$. Από την προσομοίωση είναι φανερό ότι η παρουσία της αμφίρρικτης κατασκευής προκαλεί το φαινόμενο επιτάχυνσης του ανέμου (wind speed-up effect) αυξάνοντας τη συνιστάμενη μέση ταχύτητα του ανέμου γύρω από το συγκεκριμένο σημείο έκθεσης της ανεμογεννήτριας κατά ένα συντελεστή 1.3-1.4.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δισδιάστατη ροή αέρα γύρω από μια αμφίρρικτη κατασκευή με τη βοήθεια της άμεσης αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας. Η δυνατότητα προσομοίωσης των χαρακτηριστικών της ροής και υπολογισμού αντιπροσωπευτικών φυσικών ποσοτήτων μας έδωσε τη δυνατότητα καθορισμού της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μικρής ανεμογεννήτριας ανάμεσα στις τρεις υποψήφιες θέσεις που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, εκτός από τον καθορισμό της βέλτιστης θέσης, οι πληροφορίες που ελήφθησαν από την προσομοίωση βοηθούν στο να καθοριστούν επιπλέον σημαντικά στοιχεία που συνάδουν με τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης, όπως είναι η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας και ο τύπος της.

Η μέθοδος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να εφαρμοστεί και στις περιπτώσεις όπου έχουμε συνδυασμό δισδιάστατων ή και τρισδιάστατων κατασκευών/εμποδίων διαφόρων γεωμετριών. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο προσεγγιστικής αποτίμησης της ποιότητας του αιολικού δυναμικού υποψηφίων περιοχών εγκατάστασης παρουσία φυσικών ή/και τεχνητών εμποδίων και των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, για πιο αξιόπιστα συμπεράσματα καλό θα είναι οι

προσομοιώσεις να συνδυάζονται πάντα με επιτόπιες μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καταδεικνύουν επίσης το γεγονός ότι η εγκατάσταση μικρών ανεμογεννητριών πλησίον απομονωμένων αγροτικών κατασκευών, όπου η πιθανότητα ύπαρξης λοιπών εμποδίων είναι μικρή και κατά συνέπεια το αιολικό δυναμικό είναι καλύτερης ποιότητας, μπορεί να αποτελέσει μια αειφόρο πρακτική για την κάλυψη των αναγκών τους σε ενέργεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περιοδικά

- Abohela, I., Hamza, N., Dudek, S., 2013. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. *Renewable Energy*, 50:1106-1118.
- Ayhan, D., Saglam, S., 2012. A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. *Renewable and Sustainable Energy*, 16:1040-1049.
- Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M., 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:1419-1434.
- Fragos, V. P., Psychoudaki, S. P., Malamataris, N. A., 2007. Direct simulation of two-dimensional turbulent flow over a surface-mounted obstacle. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 55:985-1018.
- Fragos, V. P., Psychoudaki, S. P., Malamataris, N. A., 2012. Two dimensional numerical simulation of vortex shedding and flapping motion of turbulent flow around a rib. *Computers & Fluids*, 69:108-121.
- Heath, M. A., Walshe, J. D., Watson, S. J., 2007. Estimating the Potential Yield of Small Building-mounted Wind Turbines. *Wind Energy*, 10:271-287.
- Ledo, L., Kosasih, P. B., Cooper, P., 2011. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Renewable Energy*, 36:1379-1391.
- Mertens, S., 2003. The energy yield of roof mounted wind turbines. *Wind Eng.*, 27(6):507-18.
- Riegler, H., 2003. HAWT versus VAWT: small VAWTs find a clear niche. *Refocus*, 4(4):44-46.

- Shikha Bhatti, T.S., Kothari, D.P., 2005. Early development of modern vertical and horizontal axis wind turbines: a review. *Wind Eng.*, 29(3):287-299.
- Walker, S. L., 2011. Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale - A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy and Buildings*, 43:1852-1862.

Κεφάλαια βιβλίων

- Gresho, P. M., Sani, R. L., 2000. *Incompressible flow and the finite element method*, Wiley.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z., 2005. *The finite element method: Its basis and fundamentals*, 6th ed., Butterworth-Heinemann.

Πρακτικά Συνεδρίων

- Milanese, M., de Risi, A., Laforgia, D., 2011. Experimental and Fluid-dynamic Analysis of a Micro Wind Turbine in Urban Area. *Proceedings from World Renewable Energy Congress*, 8-13 May, Linköping, Sweden, 2011.
- Ntinias, G. K., Kougias, P. G., Fragos, V. P., Martzopoulos G. G., 2011. Numerical Study of a Wind Turbine Type and Location Used to Produce Energy For Ventilation, Heat Pumps and Water Pumping Systems In Agricultural Structures. *16th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region*, 24-27 September, Ioannina, Greece, 2011.
- Royanin, W., Leung, P. S., Datta, P. K., 2002. The performances of a vertical Darrieus machine with modern high lift airfoils. *Proceedings from IMAREST conference MAREC 2002*, Newcastle, UK, 2002.
- Sunderland, K., Conlon, M., 2010. Estimating the yield of micro wind turbines in an urban environment: A methodology. *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 31 August-3 September, Cardiff, Wales, UK, 2010.
- Watson, S. J., Infield, D. G., Barton, J. P., Wylie, S. J., 2007. Modelling of the Performance of a Building-Mounted Ducted Wind Turbine. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 75:doi:10.1088/1742-6596/75/1/012001.

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΑΚΡΑΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ
ΚΤΙΡΙΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ
ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΕΚΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΒΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΩΝ ΜΕ ΚΑΥΣΩΝΑ**

**Δημήτρης Κ. Παπαναστασίου¹, Guoqiang Zhang², Θωμάς Μπαρτζάνης¹,
Παναγιώτης Παναγάκης³, Κωνσταντίνος Κίττας⁴**

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας,
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής και Περιβάλλοντος,

Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, Α' Βιομηχανική Περιοχή Βόλου, Τ.Θ. 15, Τ.Κ. 38500, Βόλος

²Πανεπιστήμιο Άαρχους, Τμήμα Μηχανικής, Finlandsgade 22, 8200 Άαρχους, Δανία

³Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής,

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, Αθήνα

⁴Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο
Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, Τ.Κ. 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

Αν στο εσωτερικό ενός κτηνοτροφικού κτιρίου επικρατούν δυσμενείς κλιματικές συνθήκες, είναι πιθανό να επηρεαστούν αρνητικά η εμφάνιση και η σοβαρότητα ορισμένων ασθενειών, η θερμική άνεση, ο ρυθμός ανάπτυξης και η παραγωγή γάλακτος των ζώων. Συνήθως, δεν υπάρχουν διαθέσιμες συνεχείς μετρήσεις για να μελετηθούν για πολλά χρόνια οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν εντός ενός κτιρίου και η διακύμανση παραγόντων που σχετίζονται με την ευζωία των ζώων, όπως η θερμική καταπόνηση (ΘΚ). Η παρούσα εργασία προτείνει μια μέθοδο για την ανάπτυξη μακρών χρονοσειρών θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) που επικρατούν το καλοκαίρι εντός ενός προβατοστασίου με φυσικό αερισμό. Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε για την ανάπτυξη δύο μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της T και της RH εντός του κτιρίου. Οι τιμές της T και της RH, οι οποίες καταγράφηκαν σε αγροτική περιοχή (Βελεστίνο) που βρίσκεται κοντά στο προβατοστάσιο, αποτέλεσαν τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές που παρήχθησαν από τα μοντέλα συγκρίθηκαν με μετρήσεις που καταγράφηκαν εντός του κτιρίου. Η πιστοποίηση των μοντέλων βασίστηκε σε δύο στατιστικούς δείκτες, οι τιμές των οποίων έδειξαν ότι τα μοντέλα είναι ικανά να προσομοιώσουν τα επίπεδα T και RH που επικρατούν εντός του κτιρίου. Κατόπιν, οι χρονοσειρές αξιοποιήθηκαν για να υπολογιστεί ο δείκτης θερμοκρασίας υγρασίας εντός του κτιρίου και να αποτιμηθούν συγκριτικά οι τιμές του κατά τη διάρκεια ημερών με ή χωρίς καύσωνα για περίοδο 5 ετών. Η ανάλυση έδειξε ότι οι συνθήκες ΘΚ επιδεινώθηκαν σημαντικά κατά τη διάρκεια των ημερών με καύσωνα.

Λέξεις κλειδιά: κτηνοτροφικό κτίριο, πρόβατα, θερμική καταπόνηση, δείκτης θερμοκρασίας υγρασίας, καύσωνα, παλινδρόμηση

**DEVELOPMENT OF LONG TIME SERIES OF CLIMATE CONDITIONS INSIDE LIVESTOCK BUILDINGS –
AN APPLICATION TO STUDY POTENTIAL SHEEP HEAT-STRESS UNDER HOT WEATHER**

**Dimitris K. Papanastasiou¹, Guoqiang Zhang², Thomas Bartzanas¹,
Panagiotis Panagakis³, Constantinos Kittas⁴**

¹Centre for Research and Technology Hellas, Institute for Research and Technology – Thessaly,
Laboratory of Agricultural Engineering and Environment,

Technology Park of Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, P.O. Box 15, Volos, GR-38500

²Aarhus University, Department of Engineering, Finlandsgade 22, 8200 Aarhus N, Denmark

³Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering,
Laboratory of Farm Structures, Iera Odos 75, Athens, GR-11855

⁴University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Laboratory of Agricultural
Constructions and Environmental Control, Fytokou Str., N. Ionia, Magnisia, GR-38446

dkpapan@ireteth.certh.gr, guoqiang.zhang@agrsci.dk, bartzanas@ireteth.certh.com, ppap@aua.gr, ckittas@uth.gr

If adverse climate conditions prevail inside a livestock building, the incidence and severity of certain diseases, as well as the animals' thermal comfort, growth rate and milk yield can be negatively affected. Continuous measurements are not usually available so as to study for several years the indoor climate conditions and the variation of parameters related to animals' welfare, like heat-stress. This paper proposes a method to develop long time series of summer temperature (T) and relative humidity (RH) values that prevail inside a naturally ventilated sheep barn. Linear regression analysis was applied to develop two models that were used to estimate the T and RH values inside the barn. T and RH values observed at a rural outdoor site (Velesino area) that is close to the barn were used as independent variables. The predicted values were compared against measurements recorded inside the barn. The validation of models was based on two statistical indices, whose values showed that the models are capable to simulate the indoor experimental data. Then, the time series were applied to calculate the Temperature Humidity Index inside the barn and to comparatively assess its values during heat wave and non heat wave days in a 5-year period. The analysis showed that heat-stress conditions were significantly deteriorated during heat wave days.

Keywords: livestock building, sheep, heat-stress, temperature humidity index, heat wave, regression

1. INTRODUCTION

Climate conditions within a livestock facility affect animal health and welfare. Heat-stress crucially affects the body growth, the biological functions and the productive and reproductive characteristics of sheep, therefore, it is considered as a serious threat for their short- or long-term thermal welfare. Silanikove (2000) stated that in the long-term growth, milk production and reproduction of ruminants are impaired under heat-stress as a result of the drastic changes in biological functions. Sevi et al. (2001) stated that high temperatures induce adverse effects on the thermal and energy balance, the mineral metabolism, the immune function, the udder health, and the milk production of lactating ewes during summer under the Mediterranean climate. Panagakakis and Chronopoulou (2010) found that under abnormally hot summer conditions, dairy ewes had respiration rates above normal, while their shade seeking behaviour was also affected. A widely accepted method to study animals' heat-stress is the application of the Temperature Humidity Index (THI).

A method commonly used to achieve quantitative short-term prediction is the application of regression analysis. This method has been applied in many environmental studies, including studies concerning the livestock sector (Haeussermann et al, 2008).

This paper aims to develop long time series of summer indoor T and RH values so as to study the variations of the THI during heat wave days inside a naturally ventilated sheep barn.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Data

A miniature device (model Hobo Pro v2, Onset, USA) was used to monitor T and RH inside the sheep barn. The device was placed in a white plastic shield with lateral slots for protection. The shield was fixed at ~1.5 m above the ground in the middle of the animals' housing area. Outdoor T and RH were recorded by a fully equipped automated meteorological station. Hourly averaged values are used in the present analysis. Missing values were negligible. Information about the monitoring sites and the examined period is presented in Table 1.

Table 1. Information for the location of monitoring sites and for data temporal coverage.

Monitoring site	Code name	Coordinates	Temporal coverage
Sheep barn (indoors)	BIPE	22° 52' E – 39° 23' N	August 2010, July 2011, August 2011
Outdoor site	Velestino	22° 45' E – 39° 24' N	July and August, from 2007 to 2011

2.2. Development and validation of models

Linear regression analysis was applied to develop two models (eq. 1 and 2). They were both used to estimate T and RH at BIPE (T_{in} and RH_{in} , respectively) based on T and RH recorded at Velestino (T_{out} and RH_{out} , respectively). Data observed during July and August of 2011, were used to develop the models, while data observed during August of 2010 were used to validate the models.

$$T_{in} = a \cdot T_{out} + b \quad (1)$$

$$RH_{in} = c \cdot RH_{out} + d \quad (2)$$

The validation of the models was based (Joliffe and Stephenson, 2003) on two statistical indices, namely mean absolute error, MAE, and index of agreement, d. These indices are considered as good overall measures of model performance and have been widely used in environmental studies. The validated models were used to develop the indoor T and RH time series for July and August of the period 2007 – 2011.

2.3. Identification of heat wave days

T data observed at Velestino in July and August during the period 2007 – 2011 were used. The 90th percentile of the daily maximum hourly values (DMHVs) of T was calculated. When the DMHV of temperature exceeds the 90th percentile, a heat wave day is identified. The criterion is suggested by IPCC.

2.4. Estimation of sheep's heat-stress

THI given in equation 3 was applied, whereas relevant heat-stress categories are presented in Table 2 (Marai et al, 2007).

$$THI = T_{in} - (0.31 - 0.0031 \cdot RH_{in}) \cdot (T_{in} - 14.4) \quad (3)$$

Table 2. Definition of heat-stress categories according to THI values.

THI class	Heat-stress category
THI < 22.2	absence of heat-stress
22.2 ≤ THI < 23.3	moderate heat-stress
23.3 ≤ THI < 25.6	severe heat-stress
THI ≥ 25.6	extreme severe heat-stress

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Validation of models

The low values of MAE and the high values of d (Table 3) reveal that both models are capable to simulate the indoor experimental data. MAE illustrates the presence of significant fault predictions, while d indicates the degree to which the predictions of the model are error free.

Table 3. Assessment of the models performance.

	MAE (% of the mean of the observed values)	d
Model for T	3.7	0.95
Model for RH	10.4	0.85

3.2. Identification of heat wave days

The 90th percentile of the DMHVs of T observed at Velestino in July and August during the 2007 –

2011 period was found equal to 35.8 °C. The DMHV of T exceeded this threshold in 31 days, therefore 31 heat wave days (10.2%) were identified. 11, 5, 5, 7 and 3 heat wave days were identified in years from 2007 to 2011, respectively. Figure 1 shows the distribution of the DMHVs of T during the heat wave days. The maximum DMHV was 42.8 °C and it was observed on 25 July 2007, when the peak of a strong heat wave occurred (Papanastasiou et al, 2010). The non heat wave days were 273 (89.8%). No data were available for 6 days.

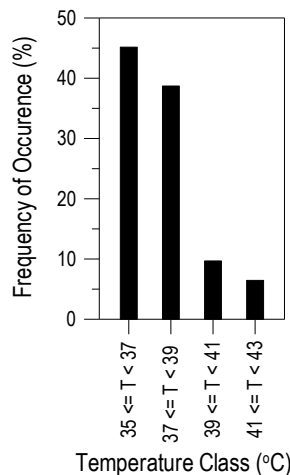
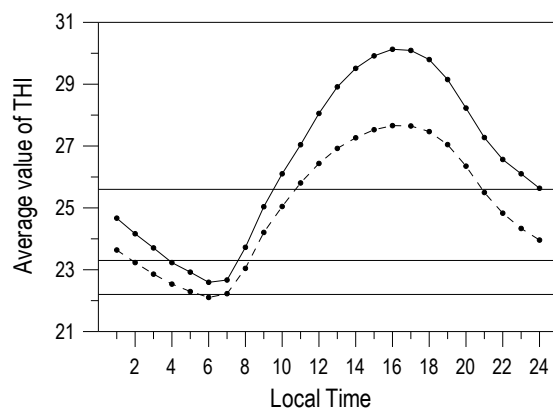


Figure 1. Frequency of occurrence of T's DMHVs during heat wave days.

3.3. Assessment of potential sheep heat-stress

Potential sheep heat-stress was assessed based on hourly THI values. The frequency of occurrence of THI classes during heat wave and non heat wave days revealed that a clear shift to higher classes is observed during heat wave days (figure 2). The averaged diurnal variation of THI during heat wave and non heat wave days (Figure 3) showed that: (a) heat-stress is always observed during heat wave days, (b) extreme severe heat-stress is observed between 10:00 and 24:00 during heat wave days and



ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the project "Assessment of techniques and technologies for reducing the environmental footprint of poultry facilities – GreenPoultry", funded by the national action "COOPERATION 2011 – Partnerships of Production

(c) the daily range of THI is higher during heat wave days than during non heat wave days.

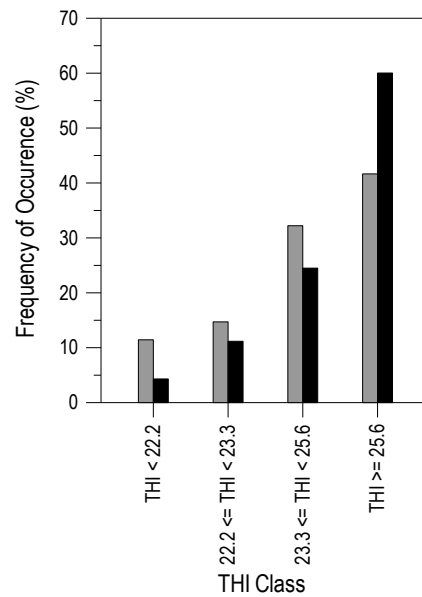


Figure 2. Frequency of occurrence of THI classes during heat wave (black bars) and non heat wave (gray bars) days

4. CONCLUSIONS

This paper presented a methodology to develop a long time series for T and RH inside a naturally ventilated sheep barn. The time series were produced by two models which were developed by applying regression analysis. As continuous indoor measurements are not usually available for long periods, the application of this methodology provides the opportunity to assess summer sheep heat-stress levels for several years. In this paper, heat-stress levels were assessed during heat wave and non heat wave days for a 5-year period and significant differences in THI levels were detected.

Figure 3. Averaged diurnal variation of THI during heat wave (solid line) and non heat wave (dashed line) days. The horizontal solid lines correspond to THI thresholds (i.e. 22.2, 23.3 and 25.6).

and Research Institutions in Focused Research and Technology Sectors", of the NSRF 2007–2013 Operational Programme "Competitiveness and Entrepreneurship", General Secretariat for Research and Technology, Ministry of Education, Lifelong Learning And Religious Affairs, Hellenic Republic.

REFERENCES

- Haeussermann, A., Costa, A., Aerts, J.M., Hartung, E., Jungbluth, T., Guarino, M., Berckmans D., 2008. Development of a dynamic model to predict PM10 emissions from swine houses. *J. Environ. Qual.*, 37:557–564
- Joliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2003. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*. Wiley, England
- Marai, I.F.M., El-Darawany, A.A., Fadiel, A., Abdel-Hafez, M.A.M., 2007. Physiological traits as affected by heat stress in sheep-A review. *Small Ruminant Res.*, 71(1-3):1–12
- Panagakos, P., Chronopoulou, E., 2010. Preliminary evaluation of the apparent short term heat-stress of dairy ewes reared under hot summer conditions. *Appl. Eng. Agric.*, 26(6):1035–1042
- Papanastasiou, D.K., Melas, D., Bartzanas, T., Kittas, C., 2010. Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze. *Int. J. Biometeorol.*, 54(3):307–317
- Sevi, A., Annicchiarico, G., Albenzio, M., Taibi, L., Muscio, A., Dell'Aquila, S., 2001. Effects of solar radiation and feeding time on behavior, immune response and production of lactating ewes under high ambient temperature. *J. Dairy Sci.*, 84(3):629–640
- Silanikove, N., 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.*, 67(1-2):1-18

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Χριστίνα-Ανθή Κατσαϊτή, Βασίλειος Φράγκος, Θωμάς Κωτσόπουλος, Χρυσούλα Νικήτα-Μαρτζοπούλου
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται αριθμητικά η ροή του αέρα γύρω από μία αγροτική κατασκευή και η μεταβολή του συντελεστή θερμικής μεταφοράς h_c , σε σχέση με τον αριθμό Reynolds. Η προσομοίωση της ροής επιτυγχάνεται με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes συνέχειας και ενέργειας, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, προσομοιώνεται η ροή μέσα σε αεροσήραγγα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση των γραμμών ροής, τις κατανομές των ταχυτήτων, τις μεταβολές της θερμοκρασίας και του συντελεστή θερμικής μεταφοράς h_c , σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.

Λέξεις κλειδιά: αγροτικές κατασκευές, εξισώσεις Navier-Stokes, εξίσωση ενέργειας, συντελεστής θερμικής μεταφοράς.

NUMERICAL APPROACH OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT ON THE EXTERNAL SURFACE OF AGRICULTURAL STRUCTURES

Christina-Anthi Katsaiti, Vassilios Fragos, Thomas Kotsopoulos, Chrysoula Nikita-Martzopoulou
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: catsaiti@gmail.com, fragos@auth.gr, mkotsop@agro.auth.gr, nikita@agro.auth.gr

This study numerically presents the airflow over a typical agricultural structure and the ratio of the heat transfer coefficient h_c . The airflow simulation is based on the solution of the Navier-Stokes equations, continuous equation and energy equation with the finite element method. Taking into account the proper boundary conditions the airflow is simulated into a wind-tunnel. The presented results include stream-lines of air flow, air velocity values, temperature contours and the heat transfer coefficient with regards to Reynolds number.

Key words: agricultural structures, Navier-Stokes equations, energy equation, heat transfer coefficient

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη του εξωτερικού περιβάλλοντος των αγροτικών κατασκευών, τα τελευταία χρόνια, έχει κινήσει το ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς επηρεάζει το εσωτερικό περιβάλλον, μεταβάλλοντας το ενεργειακό ισοζύγιο, όπως επίσης και τη στατικότητα τους (Νικήτα-Μαρτζοπούλου, 2006). Η παρουσία της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί εμπόδιο στην κίνηση του αέρα και είναι αιτία παραγωγής στροβιλισμών που μεταβάλλονται με τη μεταβολή της ταχύτητας του αέρα (Fragos *et al.*, 1997).

Στη θερμοδυναμική, ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς (h_c), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά μεταξύ ενός ρευστού κι ενός στερεού. Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς εκφράζει το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται με μεταφορά σ' ένα δευτερόλεπτο από μία επιφάνεια εμβαδού 1m^2 στον επαπτόμενο με αυτήν αέρα (και αντίστροφα) και όταν μεταξύ επιφάνειας και αέρα υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας 1°C . Στον υπολογισμό της μετάδοσης της θερμότητας στα υλικά κατασκευής, υπεισέρχεται η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή, μέσα στη στερεά μάζα του υλικού και μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά από τις επιφάνειες του υλικού προς τον επαπτόμενο σε αυτές αέρα (και αντίστροφα) (Νικήτα-

Μαρτζοπούλου, 2006). Ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον h_c , καθώς αποτελεί αναγκαίο μέσον υπολογισμού της ενεργειακής κατάστασης τους. Εμφανίζεται σε αρκετούς οδηγούς ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και χρησιμοποιείται από προγράμματα προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης (Defraeye *et al.*, 2010).

Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά από τις επιφάνειες των κατασκευών συμβάλλει σημαντικά στην ολική κατανάλωση ενέργειας. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και από την κάθετη κίνηση του προς τις πλευρικές επιφάνειες αυτών. Η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο που επηρεάζεται από το καθεστώς της ροής, τον προσανατολισμό της επιφάνειας και την τραχύτητα της (Liu and Harris, 2007).

Η διερεύνηση της ροής του αέρα σε συνάρτηση με τον συντελεστή θερμικής μεταφοράς γύρω από κατασκευές κέντρισε το ερευνητικό ενδιαφέρον για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η εκπόνηση πειραμάτων σε φυσικό μέγεθος αλλά και υπό κλίμακα, καθώς και η χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής με την αρωγή ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Οι Blocken et al. (2009) προσομοίωσαν με χαμηλούς αριθμούς Reynolds την κατανομή του συντελεστή θερμικής μεταφοράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν για την κατανομή στην προσήνεμη πλευρά, ότι ο συντελεστής αυξάνεται συνολικά από τη βάση προς την κορυφή και από το μέσον της πρόσοψης προς τις πλευρές. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίστηκαν στις άνω ακμές. Αυτό αποδίδεται στην τοπική επιτάχυνση της ροής σε αυτές τις θέσεις που μειώνουν το πάχος της οριακής στοιβάδας (Blocken et al., 2009).

Οι Karava et al. (2011) προσομοίωσαν αριθμητικά, τη μεταφορά ενέργειας στην κεκλιμένη προσήνεμη πλευρά οροφής ενός απομονωμένου χαμηλού κτιρίου που έφερε στην οροφή φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (Karava et al., 2011).

Το μεγαλύτερο μέρος των βασικών τεχνικών μέτρησης του συντελεστή θερμικής μεταφοράς έχει αποδειχθεί ότι είναι ανακριβές για τραχείες επιφάνειες, κυρίως λόγω έντασης των στροβιλισμών κοντά στα στοιχεία τραχύτητας, ως εκ τούτου οι αριθμητικές μελέτες γίνονται όλο και πιο συχνά, ιδίως χάρη στη συνεχή βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος. Έχει αποδειχθεί ότι η δισδιάστατη προσομοίωση δύναται να περιγράψει την τρισδιάστατη ροή με σχετικά καλή ακρίβεια (Keshmiri, 2012).

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε, υπολογιστικά η ροή του αέρα για μικρούς αριθμούς Reynolds, γύρω από αγροτική κατασκευή, ορθογωνίας διατομής, σε σχέση με τον συντελεστή θερμικής μεταφοράς h_c , για τρία διαφορετικά υποθετικά θερμοκρασιακά σενάρια. Οι κατασκευές χαμηλού ύψους έχουν ευρεία εφαρμογή στην πράξη (θερμοκήπια, αγροτικές κατασκευές θερμοκηπιακού τύπου, αποθήκες, αστικά κτίρια κ.α.). Η εργασία αυτή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για την εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών σε κατασκευές για μικρούς αριθμούς Reynolds.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Παρακάτω παρουσιάζεται η διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου, για ασυμπίεστη, δισδιάστατη ροή αέρα γύρω από κατασκευή μέσα σε αεροσήραγγα. Το μοντέλο περιλαμβάνει τις εξισώσεις Navier-Stokes, συνέχειας και ενέργειας. Οι οριακές συνθήκες στην είσοδο και στην έξοδο λαμβάνουν τιμές κατάλληλες ώστε να προσομοιώνεται η δισδιάστατη ροή γύρω από εμπόδιο μέσα σε αεροσήραγγα (Papanastasiou et al., 1992). Επίσης λαμβάνονται οι οριακές συνθήκες της θερμοκρασίας για τα τρία διαφορετικά υποθετικά σενάρια που υπολογίστηκαν. Η επίλυση του μοντέλου επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου των πετρερασμένων στοιχείων Galerkin.

2.1. Διέπουσες εξισώσεις

Αδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Fr} \kappa T \quad 1$$

$$u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) - \frac{1}{Fr} \kappa T \quad 2$$

Αδιάστατη εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad 3$$

Αδιάστατη εξίσωση ενέργειας

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad 4$$

Η αδιαστατοποίηση των παραπάνω εξισώσεων γίνεται χρησιμοποιώντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής :

$$x^* = \frac{x}{h}, \quad y^* = \frac{y}{h}, \quad u^* = \frac{u}{U_0}, \quad v^* = \frac{v}{U_0}, \quad 5, 6, 7, 8$$

$$p^* = \frac{p}{p_0}, \quad p_0 = \rho U_0^2, \quad T^* = \frac{T}{T_0}, \quad 9, 10, 11$$

Όπου:

u = οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας m/s
 v = κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας m/s
 T = θερμοκρασία, °K
 κ = μοναδιαίο διάνυσμα προς την κατεύθυνση της βαρύτητας

$$Re = \frac{U_0 h}{\nu} \quad \text{αριθμός Reynolds ως προς το}$$

χαρακτηριστικό μήκος

Pe = αριθμός Peclet

Fr = αριθμός Froude

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη αδιαστατοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι :

h = ύψος αγροτικής κατασκευής, m
 U_0 = χαρακτηριστική ταχύτητα, m/s
 p_0 = χαρακτηριστική ένταση πίεσης, N/m²
 T_0 = χαρακτηριστική θερμοκρασία στα τοιχώματα της κατασκευής και της αεροσήραγγας, K
 Ο αριθμός Reynolds λαμβάνεται ίσος με 200 και αντιστοιχεί στην ομοιόμορφη ταχύτητα της ροής στην είσοδο της αεροσήραγγας, $U_0=0.5\text{m/sec}$

Οι παράμετροι u^* , v^* , p^* , T^* είναι τα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των παραμέτρων u, v, p, T αντίστοιχα.

2.2. Οριακές συνθήκες

Στην παρούσα εργασία επιβλήθηκαν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες, ώστε να προσομοιώνεται η φυσική ροή αέρα γύρω από ορθογώνια κατασκευή, μέσα σε αεροσήραγγα. Ακόμη ελήφθησαν οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας ώστε να προσομοιώνονται κατά το δυνατόν καλύτερα τα τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά σενάρια. Λεπτομέρειες των οριακών συνθηκών παρουσιάζονται στους πίνακες 1, 2.

Πίνακας 1. Οι οριακές συνθήκες των συνιστωσών της ταχύτητας στην είσοδο, την έξοδο και τα τοιχώματα της αεροσήραγγας, καθώς και στα τοιχώματα της κατασκευής.

Συνιστώσες της ταχύτητας	Τοιχώματα αεροσήραγγας και κατασκευής	Είσοδος αεροσήραγγας	Έξοδος αεροσήραγγας
Οριζόντια συνιστώσα	0 (Συνθήκες μη ολισθήσεως)	1 (Ομοιόμορφη ροή)	Ελεύθερη οριακή συνθήκη
Κατακόρυφη συνιστώσα	0 (Συνθήκες μη ολισθήσεως)	1 (Ομοιόμορφη ροή)	Ελεύθερη οριακή συνθήκη

Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον πίνακα είναι αδιάστατα

Πίνακας 2. Οι οριακές συνθήκες θερμοκρασίας για τα τρία διαφορετικά σενάρια στην είσοδο, στα τοιχώματα της αεροσήραγγας, καθώς και στα τοιχώματα της κατασκευής.

Υποθετικό σενάριο θερμοκρασίας	Είσοδος αεροσήραγγας	Τοιχώματα αεροσήραγγας και κατασκευής
Υποθετικό σενάριο 1	0.2	1
Υποθετικό σενάριο 2	0.4	1
Υποθετικό σενάριο 3	0.6	1

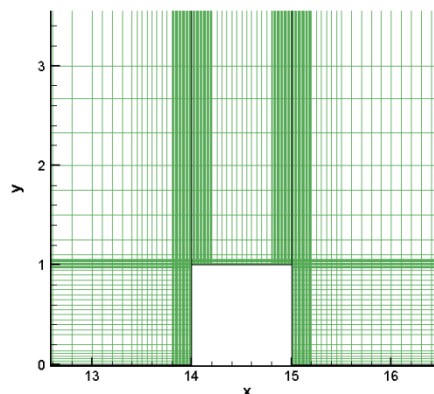
Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον πίνακα είναι αδιάστατα

2.3 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

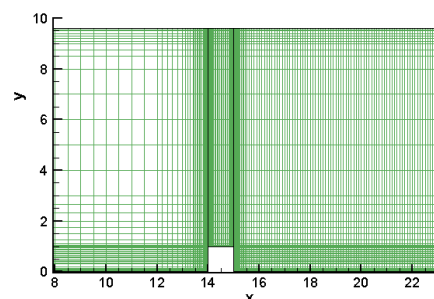
Η επίλυση των διεπουσών εξισώσεων, μετά τον ορισμό των οριακών συνθηκών, γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες επίλυσης χρησιμοποιήθηκε κώδικας πεπερασμένων στοιχείων. Ο κώδικας βασίστηκε σε μεταπτυχιακή διατριβή (Φράγκος, 1995) και τροποποιήθηκε ώστε να επιλύονται εκτός από τις εξισώσεις Navier-Stokes, συνέχειας και η εξίσωση ενέργειας. Συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού VISUAL FORTRAN 90/95.

Ο υπολογιστικός κάρναβος σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακρίβεια και ο

ελάχιστος χρόνος υπολογισμού. Στα σχήματα 1, 2 παρουσιάζεται ο υπολογιστικός κάρναβος.



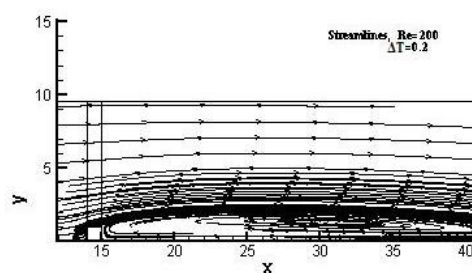
Σχήμα 1. Απεικόνιση του υπολογιστικού κάρναβου



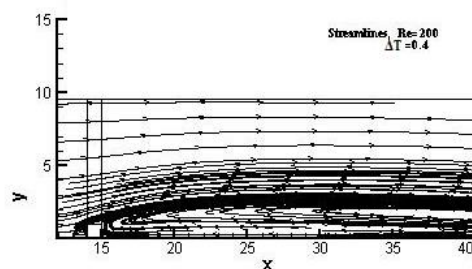
Σχήμα 2. Απεικόνιση του υπολογιστικού κάρναβου

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

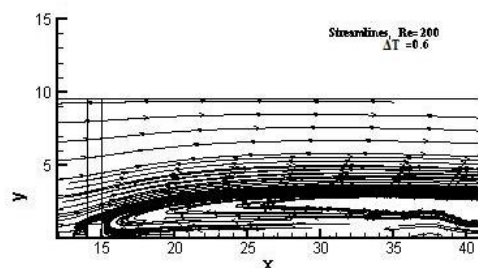
Παρατηρώντας τα σχήματα 3,4,5, διαφαίνεται η ροή γύρω από την κατασκευή, και η παραγωγή στροβιλισμών. Ο στρόβιλος κατάντη παρουσιάζει αύξηση μεγέθους όσο μεγαλώνει η θερμοκρασιακή διαφορά.



Σχήμα 3. Γραμμές ροής για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$

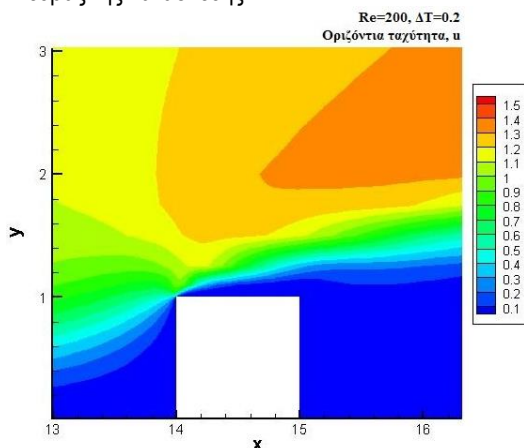


Σχήμα 4. Γραμμές ροής για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$

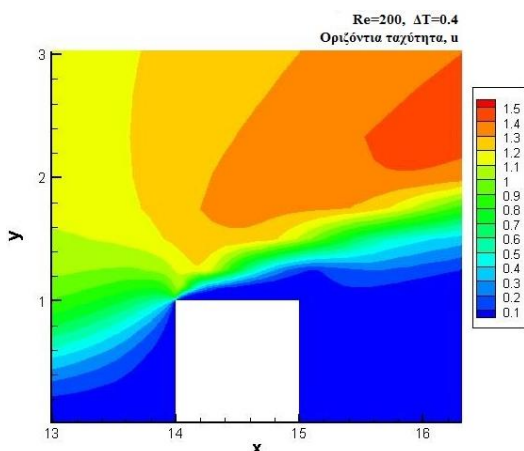


Σχήμα 5. Γραμμές ροής για αριθμό $Re=1$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$

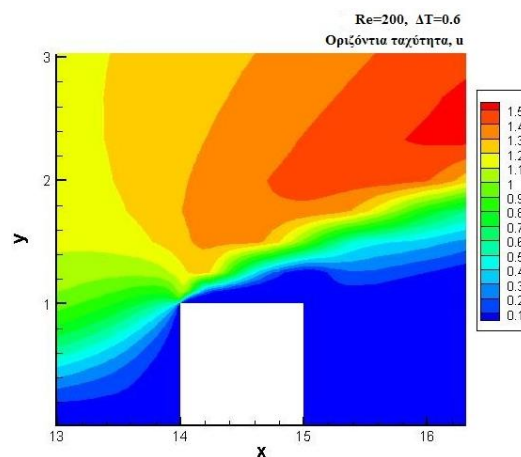
Από τα σχήματα 6,7,8 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας, u , εμφανίζονται ακριβώς πάνω από την περιοχή ανακυκλοφορίας κατάντη της κατασκευής. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT η ταχύτητα αυξάνεται κατά τη y -διεύθυνση (για τους ίδιους αριθμούς Reynolds). Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στις περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής πλησίον τόσο της ανάντη όσο και της κατάντη πλευράς της κατασκευής.



Σχήμα 6. Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$

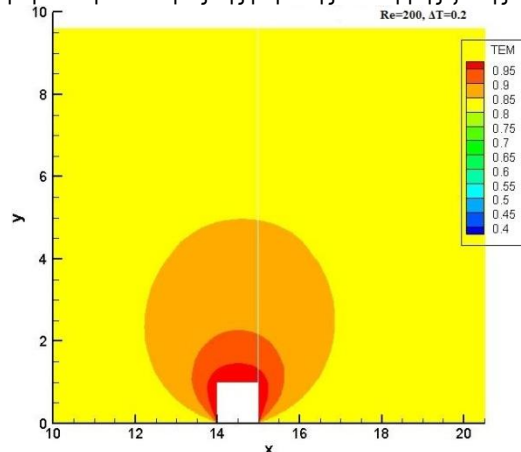


Σχήμα 7. Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.4$

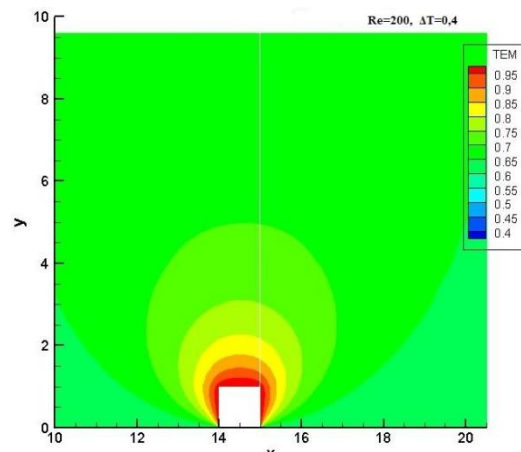


Σχήμα 8. Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.6$

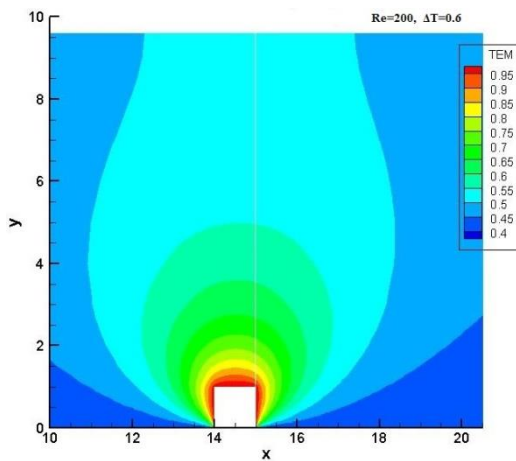
Από τα σχήματα 9,10,11 της κατανομής της θερμοκρασίας, T , προκύπτει ότι για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=0.2$ οι ισόθερμες ζώνες παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τις ισόθερμες ζώνες για $\Delta T=0.4$. Ομοίως οι ισόθερμες ζώνες για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=0.4$ παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τις ισόθερμες ζώνες για $\Delta T=0.6$. Ακόμη παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο μεγαλύτερο το εύρος της μέγιστης ισόθερμης ζώνης.



Σχήμα 9. Κατανομή θερμοκρασίας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$



Σχήμα 10. Κατανομή θερμοκρασίας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.4$



Σχήμα 11. Κατανομή θερμοκρασίας για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=0.2$

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς προκύπτει από τη σχέση:

$$h_c = \frac{q}{A \Delta \theta}$$

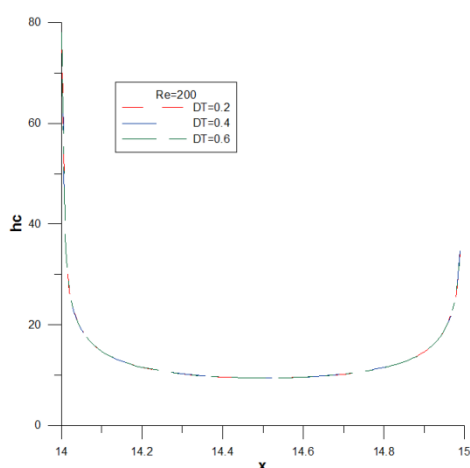
Όπου,

q = ροή θερμότητας W

A = επιφάνεια m^2

$\Delta \theta$ = διαφορά θερμοκρασίας $^{\circ}C$

Στο σχήμα 12 παρατηρείται μέγιστη τιμή του h_c ίση με $78 \text{ W/m}^{\circ}C$ στη θέση $x=14$, $y=1$ η οποία βρίσκεται στην ανάντη γωνία της κατασκευής. Στην κατάντη γωνία της κατασκευής, στη θέση $x=14.99$, $y=1$ παρατηρείται τιμή ίση με $34.6 \text{ W/m}^{\circ}C$. Η τιμή του h_c λαμβάνει μία μέση τιμή ίση με $11.89 \text{ W/m}^{\circ}C$ για το εύρος της περιοχής της οροφής από τη θέση 14.1 μέχρι τη θέση 14.9 (οι ακραίες τιμές δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό της μέσης τιμής του h_c).



Σχήμα 12. Διακύμανση συντελεστή θερμικής μεταφοράς h_c για αριθμό $Re=200$ και θερμοκρασιακές διαφορές $\Delta T=0.2$, $\Delta T=0.4$, $\Delta T=0.6$

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα του αριθμητικού πειράματος προέκυψαν τα εξής:

- η περιοχή ανακυκλοφορίας κατάντη της κατασκευής αυξάνεται κατά την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς (ΔT)
- όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT), τόσο αυξάνεται η ταχύτητα κατά την γ-διεύθυνση
- όσο αυξάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές τόσο μειώνεται το εύρος των ισόθερμων θερμοκρασιακών ζωνών
- η τιμή του h_c παραμένει σταθερή στην οροφή της κατασκευής και δεν επηρεάζεται από τους χαμηλούς αριθμούς Reynolds

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η περαιτέρω διερεύνηση για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds και πιο ρεαλιστικές συνθήκες κρίνεται απαραίτητη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Blocken, B., Defraeye, T., Derome, D., Carmeliet, J., 2009. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment* 44, 2396-2412.
- Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J., 2010. CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 297-308.
- Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P., Malamataris, N.A., 1997. Computer-aided analysis of flow past a surface-mounted obstacle. *International Journal for numerical Methods in Fluids* 25, 495-512.
- Karava, P., Jubayer, C.M., Savory, E., 2011. Numerical modelling of forced convective heat transfer from the inclined windward roof of an isolated low-rise building with application to photovoltaic/thermal systems. *Applied Thermal Engineering* 31, 1950-1963.
- Keshmiri, A., 2012. Numerical sensitivity analysis of 3- and 2- dimensional rib-roughened channels. *Heat Mass Transfer* 48, 1257-1271.
- Liu, Y., Harris, D.J., 2007. Full-scale measurements of convective coefficient on external surface of a low-rise building in sheltered conditions. *Building and Environment* 42, 2718-2736.
- Papanastasiou, T.C., Malamataris, N.A., Ellwood, K., 1992. A new outflow boundary condition. *International Journal for numerical Methods in Fluids* 14, 587-608.
- Νικήτα-Μαρτζοπούλου, Χ., 2006. Κτηνοτροφικές κατασκευές. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Φράγκος, Β.Π., 1995. Μεταπτυχιακή Διατριβή: Μαθηματική Προσομοίωση Ροής Αέρα Γύρω Απο Σταθερό Επιφανειακό Εμπόδιο.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΧΑΛΑΖΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΝΔΡΩΔΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μενέλαος Θεοχάρης¹

¹Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Εγγειοβελτιωτικών Έργων, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Κωστακιοί Άρτας, Τ.Κ. 47100 , e-mail: theoxar@teiep.gr.

Το χαλάζι είναι ένας φυσικός περιβαλλοντικός κίνδυνος που μπορεί μέσα σε ελάχιστα λεπτά της ώρας να καταστρέψει ολόκληρες παραγωγές. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας των καλλιεργειών από αυτό, είναι η κάλυψη των φυτειών με αντιχαλαζικά δίχτυα. Κάθε εγκατάσταση αντιχαλαζικών δικτύων προϋποθέτει την ύπαρξη βασικής υποστήλωσης η οποία περιλαμβάνει τους στύλους και τα σύρματα (τένοντες) στα οποία πρόκειται να αναρριχηθούν και να προσδεθούν τα φυτά. Μέχρι το 2012 δεν υπήρχαν στην Ελλάδα τεχνικές προδιαγραφές για την κατασκευή των στύλων της βασικής υποστήλωσης. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατόν να δημιουργηθούν εγχώριες βιομηχανίες κατασκευής τους και οι στύλοι, είτε ήταν εισαγόμενοι, είτε κατασκευάζονταν με ευθύνη των καλλιεργητών. Το 2012 ο ΕΛ.Γ.Α. συγκρότησε ομάδα εργασίας με αποστολή τη σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών για: α) σύστημα προστασίας με αντιχαλαζικά δίχτυα των καλλιεργειών μηλοειδών, πυρηνοκάρπων, αμπελοειδών και ακτινιδιών και β) συνδυαστικό σύστημα προστασίας με αντιβροχικές μεμβράνες και αντιχαλαζικά δίχτυα για την καλλιέργεια της κερασιάς. Στα πλαίσια των εργασιών της ομάδας εργασίας, συντάχθηκε πρότυπη τεχνική μελέτη στην οποία, πλην των άλλων, περιλαμβάνεται και ο υπολογισμός των φορτίσεων των στύλων των αντιχαλαζικών δικτύων. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των φορτίσεων των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας. Οι φορτίσεις αυτές στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για τη στατική επίλυση και τη διαστασιολόγηση των στύλων.

Λέξεις κλειδιά: χαλάζι, προστασία, αντιχαλαζικό δίχτυ, φόρτιση, στύλος, δενδρώδης καλλιέργεια , ΕΛ.Γ.Α.

Calculating the actions on the columns of an anti-hail system for tree crops in Greece

Menelaos Theocharis

Laboratory of Agricultural Constructions and land-improvement works, Department of Crop Production ,Technical Educational Institution of Epirus, 47100 Arta , Greece , e-mail: theoxar@teiep.gr.

Hail is an environmental danger which can destroy the whole crop just in a few minutes. The most effective way of protecting crops against hail, is to cover the plantations with anti-hail nets. For each structure of hail-net a basic supporting construction is required which includes the columns and the wires (tendons) on which the plants have to be supported. Until 2012 there were no technical specifications for the basic supporting construction in Greece. For this reason it wasn't possible for any construction industry to create them, so the columns were either imported or constructed by farmers themselves. In 2012 the Hellenic Organization of Agricultural Insurances (EL.G.A.) established a working group for the specification of all the appropriate technical specifications for: a) an anti hail protection system using anti-hail nets so that several tree crops should be protected and b) a combination protection system against hail and rain using anti-hail nets and anti - rain membranes for the cherry crop. That working group produced a structural calculation study in which, except of others, the calculations of the actions on the columns of the anti-hail system for tree crops were included. In this paper the actions on the columns of an anti-hail system for tree crops in Greece is calculated. These actions subsequently will be used in static calculations and moreover for the dimensioning of columns.

Key words: hail, protection, anti-hail net, action, column, tree crop, EL.G.A.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κυριότερες μέθοδοι, που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των καταστροφών από τη χαλαζόπτωση, είναι οι ακόλουθες: α) Σπορά νεφών. β) Αντιχαλαζικά κανόνια ηχοβολής. γ) αντιχαλαζικά δίχτυα, τα οποία είναι και τα πιο αποτελεσματικά μέσα προστασίας. Τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίηση των αντιχαλαζικών δικτύων έχει μεγάλη ανάπτυξη, τόσο παγκοσμίως όσο και στη χώρα μας, όπου με πρωτοβουλία του ΕΛ.Γ.Α. γίνεται προστασία στα μηλοειδή, τα πυρηνόκαρπα, τα ακτινίδια, τα αμπέλια και τις κερασιές.

Κάθε εγκατάσταση αντιχαλαζικής προστασίας αποτελείται από τα δίχτυα κάλυψης και το σκελετό στήριξης αυτών. Μέχρι σήμερα οι εγκαταστάσεις

αντιχαλαζικής προστασίας δεν έχουν αποτελέσει αντικείμενο Εθνικού ή Ευρωπαϊκού προτύπου και για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση οι διατάξεις των Ευρωκωδίκων και οι περιορισμένες πληροφορίες, που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία για το υπόψη θέμα. Στην Ελλάδα έχουν γίνει μελέτες σχετικές: α) με τη μηχανική συμπεριφορά και τις ιδιότητες των από HDPE δικτύων κάλυψης των γεωργικών κατασκευών (Briassoulis et al.,2007a,b) και β) με τη μεθοδολογία σχεδιασμού των γεωργικών κατασκευών που καλύπτονται με δίχτυα (Briassoulis and Mistriotis, 2010).

Η έλλειψη τεχνικών προδιαγραφών για την κατασκευή των στύλων των σκελετών στήριξης των

εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας είχε συνέπεια να μην δημιουργηθούν στην Ελλάδα εγχώριες βιομηχανίες κατασκευής και οι στύλοι, είτε ήταν εισαγόμενοι, είτε κατασκευαζόταν με ευθύνη των καλλιεργητών χωρίς κανένα τεχνικό έλεγχο. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος ήτο το υψηλό κόστος των στύλων και το αμφίβολο της ποιότητάς τους. Στην παρούσα μελέτη γίνεται υπολογισμός των φορτίσεων των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας δενδρωδών καλλιεργειών στην Ελλάδα οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τη στατική επίλυση και τη διαστασιολόγησή τους.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

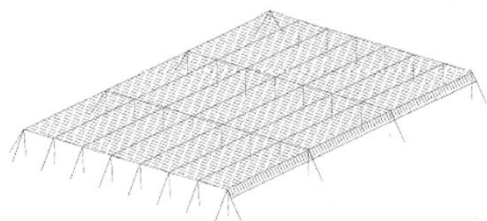
2.1. Η εγκατάσταση αντιχαλαζικών δικτύων

2.1.1. Ιδιότητες της κατασκευής

Στις εγκαταστάσεις προστασίας από το χαλάζι θα πρέπει να εξασφαλίζονται τα εξής (ΕΛ.Γ.Α., 2012): α) Προστασία του φυτικού κεφαλαίου και της παραγωγής. β) Ανεξαρτησία του χώρου της εγκατάστασης ώστε να μην παρακλύεται η εγκατάσταση από όμορες ιδιοκτησίες, ούτε να παρακλύει την εγκατάσταση σε αντίστοιχες όμορες ιδιοκτησίες. γ) Απρόσκοπτη προσπέλαση στο χώρο προστασίας. δ) Άνετη κυκλοφορία προσώπων και μηχανημάτων, για την εκτέλεση των γεωργικών εργασιών στο χώρο της εγκατάστασης. ε) Αντοχή της κατασκευής σε διακυμάνσεις θερμοκρασίας από -15 έως 60 °C. ζ) Δυνατότητα ασφαλούς παραλαβής όλων των φορτίων από την κατασκευή χωρίς να γίνεται υπέρβαση των ορίων αντοχής των υλικών από τα οποία συντίθεται η κατασκευή. η) Στερεότητα, έτσι ώστε αν προκληθεί μια ζημιά σε μια αυτοτελή μονάδα, να μην έχει γενικότερη επίπτωση στη στερεότητα των άλλων μονάδων.

2.1.2. Η υποστήλωση της κατασκευής

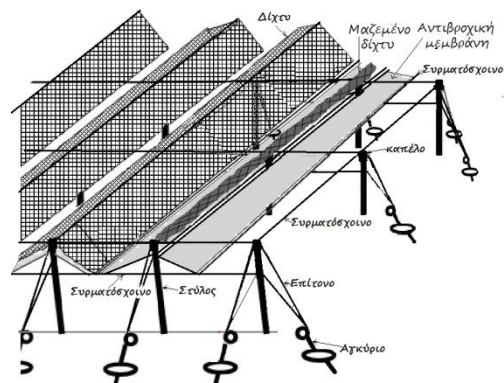
Κάθε εγκατάσταση αντιχαλαζικών δικτύων προϋποθέτει την ύπαρξη βασικής υποστήλωσης ικανής να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν. Η βασική υποστήλωση περιλαμβάνει τους στύλους και τα σύρματα στα οποία πρόκειται να αναρριχηθούν και να προσδεθούν τα φυτά. Στο σχήμα 1 δίνεται σχηματική παράσταση μιας τυπικής εγκατάστασης αντιχαλαζικών δικτύων. Η υποστήλωση της εγκατάστασης πρέπει να είναι ανεξάρτητη και να μην εμποδίζεται από κάθε άλλη κατασκευή που τυχόν θα υπάρχει μέσα στο χώρο προστασίας.



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση μιας τυπικής εγκατάστασης αντιχαλαζικών δικτύων.

Οι στύλοι μπορεί να είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα (σιδηροπαγές ή προεντεταμένο) ή ξύλινοι ή

μεταλλικοί. Πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένοι, οι κορυφές τους να βρίσκονται σε οριζόντιο επίπεδο και να εξασφαλίζεται η στερεή έδρασή τους στο έδαφος. Το άνω άκρο τους πρέπει να καλύπτεται με κατάλληλο ειδικό πλαστικό κάλυμμα, το "καπέλο", το οποίο στερεώνει σε αυτούς τους τένοντες σύνδεσης. Όλοι οι περιμετρικοί στύλοι πρέπει να υποστηριχθούν από αντιστήριξη με αγκύρια και επίτονα με τεντωτήρα. Στο σχήμα 2 δίνεται η ονοματολογία των εξαρτημάτων μιας εγκατάστασης αντιχαλαζικών δικτύων και στον πίνακα 1 φαίνονται τα γεωμετρικά και κλιματολογικά δεδομένα μιας εγκατάστασης προστασίας δενδρωδών καλλιεργειών (ΕΛ.Γ.Α., 2012).



Σχήμα 2. Ονοματολογία των εξαρτημάτων μιας τυπικής εγκατάστασης αντιχαλαζικών δικτύων

Πίνακας 1. Γεωμετρικά και κλιματολογικά δεδομένα μιας εγκατάστασης προστασίας δενδρωδών καλλιεργειών.

Δεδομένα	Τιμές
Αποστάσεις μεταξύ των γραμμών, C [m]	4,00
Αποστάσεις των στύλων στη γραμμή, L [m]	10,00
Γωνία κλίσης των ακραίων στύλων των μεσαίων γραμμών, ω [μοίρες]	80
Γωνία κλίσης των μεσαίων στύλων των ακραίων γραμμών, ω' [μοίρες]	80
Ύψος του στύλου (ολικό), h [m]	5,00
Ταχύτητα ανέμου, $V_{b(0)}$ [m/s]	27,00
Συχνότητα επανεμφάνισης του ανέμου, p [%]	5
Γωνίες της αντιστήριξης του τένοντα με την κατακόρυφη, $\varphi = \varphi'$ [μοίρες]	12

2.2. Οι φορτίσεις των στύλων

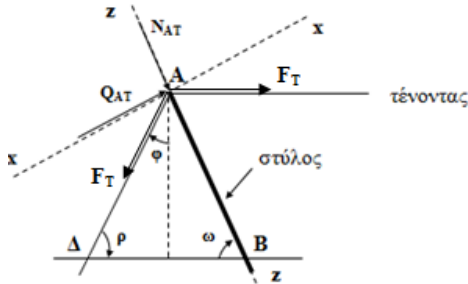
Οι στύλοι συνδέονται μεταξύ τους με χαλύβδινους τένοντες οι οποίοι είναι δύο κατηγοριών: α) παράλληλοι στις γραμμές φύτευσης και β) κάθετοι σε αυτές. Οι πρώτοι είναι προεντεταμένοι και επιβάλλουν φορτία στους στύλους ενώ οι δεύτεροι είναι απλοί, παραλαμβάνουν φορτία από τους στύλους και τα μεταβιβάζουν στο έδαφος. Οι τένοντες στηρίζονται στους στύλους χωρίς τριβές και για το λόγο αυτό οι μεν παράλληλοι στις γραμμές φύτευσης μεταβιβάζουν στους στύλους μόνο θλιπτικές και τέμνουσες δυνάμεις

(και όχι εφελκυστικές) οι δε κάθετοι στις γραμμές φύτευσης μεταβιβάζουν μόνο τέμνουσες δυνάμεις.

Οι δράσεις στις κεφαλές των στύλων οφείλονται στην δύναμη προέντασης των τενόντων και στην ανεμοφόρτιση των διχτυών. Η δύναμη προέντασης των τενόντων είναι οριζόντια αξονική δύναμη και η δύναμη από την ανεμοφόρτιση δρα κάθετα στην κεκλιμένη επιφάνεια των διχτυών.

2.2.1. Δράσεις λόγω της προέντασης του τένοντα

Οι δράσεις στις κεφαλές των στύλων από τη δύναμη προέντασης του τένοντα, σχήμα 3, υπολογίζονται από τις σχέσεις (Θεοχάρης, 2012):



Σχήμα 3. Οι συνιστώσες της δράσεως στην κεφαλή κεκλιμένου στύλου λόγω οριζόντιας δύναμης.

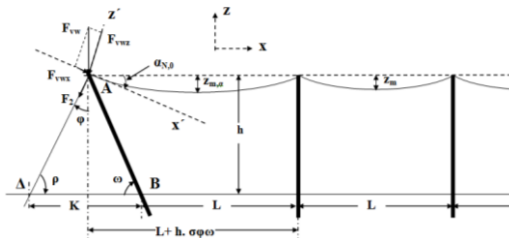
$$N_{AT} = F_T (\eta \mu(\omega - \varphi) + \sin \omega) \quad (1)$$

$$Q_{AT} = F_T (\eta \mu \omega - \sin(\omega - \varphi)) \quad (2)$$

όπου F_T είναι η δύναμη προέντασης του τένοντα, ω είναι η κλίση του στύλου και φ είναι η γωνία της αντιστήριξης του τένοντα με την κατακόρυφη.

2.2.2. Δράσεις λόγω της κατακόρυφης φόρτισης του τένοντα από ανεμοφόρτιση

Όταν στον τένοντα επιβάλλεται κατακόρυφη φόρτιση από την ανεμοφόρτιση του διχτυού, ο τένοντας καμπυλώνεται, σχήμα 4, και με πολύ καλή προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι η εξίσωση της καμπύλης είναι 2ου βαθμού. Με την παραδοχή αυτή, οι δράσεις στην κεφαλή του στύλου, σχήμα 5, υπολογίζονται από τις σχέσεις (Θεοχάρης, 2012):



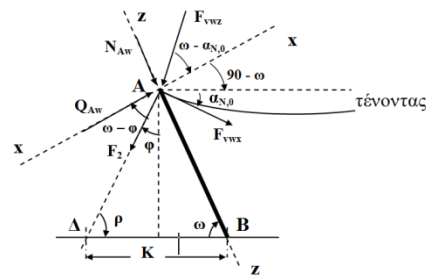
Σχήμα 4. Οι δράσεις στην κεφαλή του στύλου λόγω κατακόρυφης δράσεως στον τένοντα.

$$N_{Aw} = F_{vw} [\sin \alpha_{N,0} \eta \mu(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu \alpha_{N,0} (\sin(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu(\omega - \varphi))] \quad (3)$$

και

$$Q_{Aw} = F_{vw} [-\sin \alpha_{N,0} \sin(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu \alpha_{N,0} (\eta \mu(\omega - \alpha_{N,0}) - \sin(\omega - \varphi))] \quad (4)$$

όπου F_{vw} είναι η συνισταμένη των κατακόρυφων δράσεων στην κεφαλή A του στύλου λόγω της ανεμοφόρτισης και $\alpha_{N,0}$ είναι η γωνία κλίσεως του τένοντα στο σημείο A.



Σχήμα 5. Οι συνιστώσες της δράσεως στην κεφαλή κεκλιμένου στύλου λόγω κατακόρυφης δράσεως στον τένοντα.

2.2.3. Η συνολική ανεμοφόρτιση στο δίχτυ

Ο υπολογισμός γίνεται με μέθοδο που προτείνεται στο μέρος 1 - 4 του Ευρωκώδικα 1 (EN 1991 ή αλλιώς EC1). Η συνολική δύναμη που επενεργεί σε μία κατασκευή, F_w , δρα, σύμφωνα με την § 5.3 του EC1, κάθετα στην προσβαλλόμενη επιφάνεια και προκύπτει από τη σχέση :

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad [N/m^2] \quad (5)$$

όπου:

$c_s c_d$ είναι ο δυναμικός συντελεστής, ο οποίος σύμφωνα με την § 6.2 του EC1 για κατασκευές με ύψος μικρότερο από 15 μέτρα είναι ίσος με 1.

c_f είναι ο συντελεστής δύναμης, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 7.7. της § 7.3. του EC1, για συντελεστή πληρότητας $\varphi = 0$ επειδή στην προσήνεμη πλευρά υπάρχουν εμπόδια (η κόμη των φυτών) και για γωνία κλίσεως του διχτυού $\alpha = 24,70^\circ$ (Θεοχάρης, 2012). Προκύπτει $\min c_f = -1,0$ και $\max c_f = +0,7$.

Οι παραπάνω τιμές του c_f προέκυψαν με την προϋπόθεση ότι οι προσβαλλόμενες επιφάνειες είναι συμπαγείς και αδιαπέρατες από τον άνεμο πράγμα το οποίο δεν ισχύει στα αντιχαλαζικά δίχτυα όπου η ανεμοφόρτιση είναι σημαντικά μειωμένη.

Η επιτροπή του ΕΛ.Γ.Α. κατά τη συνεδρίαση της 7-12-2012 απεφάσισε να μειώσει τους συντελεστές δύναμης για τα αντιχαλαζικά δίχτυα σε $\min c_f = -0,6$ και $\max c_f = +0,5$.

$Q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_p(z_e) = q_b c_e(z_e) \quad [N/m^2] \quad (6)$$

Η $Q_p(z_e)$ για ύψος αναφοράς z_e , περίοδο επανεισφάνισης του ανέμου $T = 20$ έτη και για εδάφη σχεδόν επίπεδα, υπολογίζεται (Μ. Θεοχάρης, 2000, 2011, 2012) από τις σχέσεις :

α. Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες :

$$q_p(z_e) = q_{b(p)} \cdot c_e(z_e) = 780,03 \quad [N/m^2] \quad (7)$$

β. Για το εσωτερικό της χώρας :

$$q_p(z_e) = q_b c_e(z_e) = 522,16 \quad [N/m^2] \quad (8)$$

Το ύψος αναφοράς $z_e = z_i = z$ για τα στέγαστρα, σύμφωνα με την § 7.3.(8) του EC1 είναι η απόσταση από το έδαφος μέχρι το ύψος της υδρορρόης.

A_{ref} είναι η επιφάνεια αναφοράς ήτοι η κεκλιμένη παρειά της επιφάνειας του διχτυού.

Επομένως η συνολική δύναμη από ανεμοφόρτιση προκύπτει (Θεοχάρης, 2012):

α. Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες:

$$\max F_w^+ = +390,00 \cdot A_{ref} \quad [N] \quad (9)$$

$$\min F_w^- = -468,00 \cdot A_{ref} \quad [N] \quad (10)$$

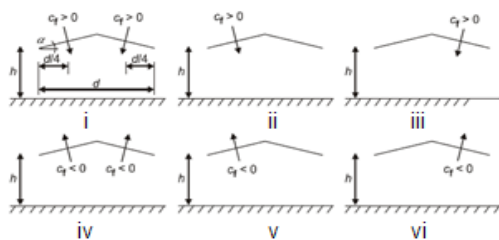
β. Για το εσωτερικό της χώρας :

$$\max F_w^+ = +261,08 \cdot A_{ref} \quad [N] \quad (11)$$

$$\min F_w^- = -313,30 \cdot A_{ref} \quad [N] \quad (12)$$

2.2.3. Η συνολική ανεμοφόρτιση των τενόντων

Σύμφωνα με την § 7.3. (6) του EC1 για τα δικλινή στέγαστρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη έξι διαφορετικές περιπτώσεις φορτίσεως όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Σχήμα 7.17 του prEN 1991-1-4:2004, σελ. 61

Από τις παραπάνω φορτίσεις για το εσωτερικό της χώρας προκύπτει:

α. Η μέγιστη κατακόρυφη δύναμη προς τα κάτω είναι εκείνη της περιπτώσεως i :

$$F_w^+ = +2 \cdot F_w^+ \cdot \sin \alpha \cdot f = +261,08 \cdot C \quad [N/m] \quad (13)$$

όπου f είναι το κεκλιμένο ύψος της παρειάς του διχτυού.

Η μέγιστη κατακόρυφη δύναμη προς τα πάνω είναι εκείνη της περιπτώσεως ii:

$$\min F_w^- = -2 \cdot F_w^- \cdot \sin \alpha \cdot f = -313,30 \cdot C \quad [N/m] \quad (14)$$

η οποία συνεπάγεται εφελκυστική καταπόνηση στους στύλους.

Επειδή όμως ο τένοντας δεν είναι αγκυρωμένος στους στύλους, η δύναμη αυτή δεν καταπονεί τους στύλους αλλά μεταφέρεται από τον τένοντα και παραλαμβάνεται από τα αγκύρια.

β. Η μέγιστη οριζόντια δύναμη είναι εκείνη των περιπτώσεων iv και vi :

$$F_{Hw}^- = -72,54 \cdot C \quad [N/m] \quad \text{προς τα αριστερά} \quad (15)$$

$$F_{Hw}^+ = +72,54 \cdot C \quad [N/m] \quad \text{προς τα δεξιά} \quad (16)$$

Κατά την επιβολή των οριζοντίων δυνάμεων στις κεφαλές των στύλων προκαλείται εφελκυσμός του τένοντα, ο οποίος είναι κάθετος στη γραμμή, απορροφούμενου για το σκοπό αυτό ενός μέρους της δύναμης. Το τμήμα της δύναμης που απομένει εφαρμόζεται ως τέμνουσα δύναμη στην κεφαλή του στύλου κατά τη διεύθυνση y-y. Η δύναμη που αναλώνεται για τον εφελκυσμό του τένοντα μπορεί να εκτιμηθεί (Θεοχάρης, 2012), από τη σχέση:

$$F_e = \sigma_e \cdot A_T = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_T = \frac{\Delta C}{C} \cdot E_s \cdot A_T \quad (17)$$

όπου: $E_s = 20 \text{ GPa}$ είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, A_T είναι το εμβαδόν της διατομής του τένοντα και $\frac{\Delta C}{C} = 1,74 \%$ είναι η ανηγμένη παραμόρφωση του τένοντα. Αν ληφθεί ως διάμετρος του τένοντα $\delta = 7 \text{ mm}$ προκύπτει:

$$F_e = 1,74 \% \cdot 20 \text{ GPa} \cdot \frac{\pi \cdot (7 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1339,26 [N]$$

Η παραμένουσα οριζόντια δράση στην κεφαλή κάθε στύλου που θα ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς ως τέμνουσα δύναμη είναι:

$$F_{Hw,t} = \frac{F_{Hw}}{C} A_{ref} - F_e \quad (18)$$

όπως αυτή εξειδικεύεται κατά περίπτωση.

Παρατήρηση: Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες ισχύουν ανάλογα οι σχέσεις 13 έως 16 όπου τα $\max F_w$ και $\min F_w$ παίρνονται από τις σχέσεις 9 και 10.

2.3. Επαλληλία φορτίσεων των στύλων

2.3.1. Μεσαίες γραμμές

2.3.1.1. Ακραίοι στύλοι

2.3.1.1.1. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση x-x (παράλληλα στον άξονα της γραμμής)

2.3.1.1.1.1. Φόρτιση στην κεφαλή των στύλων

Δύο είναι οι πιθανές περιπτώσεις φορτίσεως :

1. Φόρτιση από την προέκταση του τένοντα.

Αξονική θλιπτική δύναμη:

$$N_{At} = F_T \cdot (\eta \mu(\omega - \varphi) + \sin \omega) \quad (1)$$

Τέμνουσα δύναμη:

$$Q_{At} = F_T \cdot (\eta \mu \omega - \sin(\omega - \varphi)) \quad (2)$$

2. Φόρτιση από την προέκταση του τένοντα και την κατακόρυφη συνιστώσα της ανεμοφόρτισης

Αξονική θλιπτική δύναμη

$$N_{A,t+w} = F_T \left[\sin \alpha_{N,0} (\eta \mu(\omega - \varphi) + \sin \omega) + \eta \mu \alpha_{N,0} \sin \omega \right] + F_{w,a} \left[\sin \alpha_{N,0} \cdot \eta \mu(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu \alpha_{N,0} (\sin(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu(\omega - \varphi)) \right] \quad (19)$$

Τέμνουσα δύναμη

$$Q_{A,t+w} = F_T \left[\sin \alpha_{N,0} (\eta \mu \omega - \sin(\omega - \varphi)) + \eta \mu \alpha_{N,0} \eta \mu \omega \right] + F_{w,a} \left[-\sin \alpha_{N,0} \sin(\omega - \alpha_{N,0}) + \eta \mu \alpha_{N,0} (\eta \mu(\omega - \alpha_{N,0}) - \sin(\omega - \varphi)) \right] \quad (20)$$

όπου :

$$F_{w,a} = \pm 261,08.C \cdot \frac{h \cdot \sigma\varphi\omega + L}{2} \quad [N] \quad (21)$$

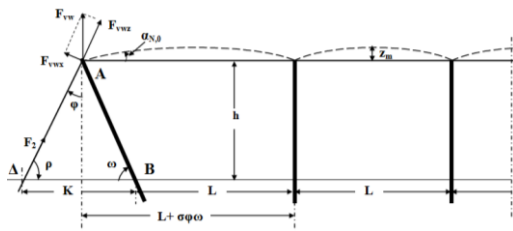
2.3.1.1.2. Φόρτιση στην αγκύρωση των στύλων

Επειδή ο τένοντας δεν είναι αγκυρωμένος στο στύλο, η δύναμη F_{wv} μεταφέρεται στην αντηρίδα χωρίς τριβές οπότε $F_2 = F_{wvx}$, σχήμα 7. Από την αντηρίδα η δύναμη αυτή μεταφέρεται και παραλαμβάνεται από το αγκύριο.

Επομένως η συνολική δύναμη η οποία ασκείται στο αγκύριο είναι:

$$F_{\Delta w} = - 313,30.C \cdot \left(h \cdot \sigma\varphi\omega + \frac{n \cdot L}{2} \right) + F_T \quad [N] \quad (22)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των φανωμάτων της κάθε σειράς στύλων.



Σχήμα 7. Φόρτιση των αγκυρώσεων των μεσαίων γραμμών

Επειδή η δύναμη $F_{\Delta w}$ είναι εξαιρετικά μεγάλη, η αγκύρωση πρέπει να κατασκευαστεί με ιδιαίτερη προσοχή, διότι ενδεχόμενη μετακίνηση του σημείου Δ προς την πλευρά του B, σχήμα 7, θα προκαλέσει δευτερογενή καταπόνηση στον ακραίο στύλο επειδή θα αυξηθεί η γωνία $\alpha_{N,0}$ και επομένως και οι $N_{A,T+w}$ και $Q_{A,T+w}$.

2.3.1.1.2. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση y - y (κάθετα στον άξονα της γραμμής)

Κατά τη διεύθυνση y - y αναπτύσσεται δράση τόσο από την κατακόρυφη όσο και από την οριζόντια συνιστώσα της ανεμοφόρτισης. Οι δράσεις από την ελαστική παραμόρφωση του τένοντα αλληλοεξουδετερώνονται.

Αξονική θλιπτική δύναμη

Είναι η υπολογιζόμενη κατά περίπτωση από τις εξισώσεις (19) και (21).

Τέμνουσα δύναμη

Επειδή οι δράσεις από την ελαστική παραμόρφωση του τένοντα αλληλοεξουδετερώνονται, η παραμένουσα οριζόντια δράση στην κεφαλή κάθε στύλου που θα ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς είναι:

$$Q_{A,w} = \pm 72,54.C \cdot \frac{h \cdot \sigma\varphi\omega + L}{2} \mp F_e \quad [N] \quad (23)$$

2.3.1.2. Μεσαίοι στύλοι

2.3.1.2.1. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση x-x

Οι μεσαίοι στύλοι των μεσαίων γραμμών αποτελούν ειδική περίπτωση των ακραίων στύλων για $\omega = \varphi = 90^\circ$

Φόρτιση από την προένταση του τένοντα και την κατακόρυφη συνιστώσα της ανεμοφόρτισης

Αξονική θλιπτική δύναμη

$$N_{A,T+w} = F_{wvt\mu} \cdot \left[\sin^2 \alpha_{N,0} + \eta \mu^2 \alpha_{N,0} \right] = F_{wvt\mu} \quad (24)$$

όπου:

$$F_{wv,\mu} = + 261,08.C.L \quad [N] \quad (25)$$

για όλους του στύλους και

$$F_{wv,\mu} = + 261,08.C \cdot \left(\frac{h \cdot \sigma\varphi\omega}{2} + L \right) \quad [N] \quad (26)$$

για τους παρακραίους στύλους.

Τέμνουσα δύναμη

Όταν από το δεξιό φάνωμα αναπτύσσεται τέμνουσα $Q_{A,T+w}$, από το αριστερό αναπτύσσεται τέμνουσα $-Q_{A,T+w}$.

Επομένως για όλους τους στύλους είναι:

$$Q_{A,T+w,t} = 0 \quad (27)$$

2.3.1.2.2. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση y - y

Ισχύουν αναλογικά τα αναφερόμενα στην παράγραφο 2.3.1.1.2.

Αξονική θλιπτική δύναμη

Είναι η υπολογιζόμενη κατά περίπτωση από τις εξισώσεις (24), (25) και (26).

Τέμνουσα δύναμη

$$Q_{A,w} = \pm 72,54.C.L \mp F_e \quad [N] \quad (28)$$

Για τους παρακραίους στύλους ισχύει η ίδια σχέση

όπου αντί του L τίθεται $\left(\frac{h \cdot \sigma\varphi\omega}{2} + L \right)$.

2.3.2. Ακραίες γραμμές

2.3.2.1. Μεσαίοι στύλοι

2.3.2.1.1. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση x-x

Ισχύουν ακριβώς οι υπολογισμοί των μεσαίων στύλων της μεσαίας σειράς οι οποίοι περιγράφονται στην § 2.3.1.2.1. με τις ίδιες τιμές των εντατικών μεγεθών.

Επειδή οι στύλοι των ακραίων γραμμών είναι κεκλιμένοι υπό γωνία ω' κατά τη διεύθυνση y-y, για να εξασφαλιστεί η ισαποχή μεταξύ των τενόντων των γραμμών φύτευσης, οι στύλοι αυτοί θα κατασκευαστούν σε απόσταση $C - h \cdot \sigma\varphi\omega'$ από την παρακραία γραμμή.

2.3.2.1.2. Φόρτιση κατά τη διεύθυνση y - y

Ισχύουν κατ' αναλογία όσα αναπτύχθηκαν στις §§ 2.3.1.1.2. και 2.3.1.2.2.

2.3.2.1.2.1. Φόρτιση στην κεφαλή των στύλων

Αξονική θλιπτική δύναμη

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{A,T+w} = F_{wv,\mu} + F_{A,T+w} \cdot (\eta \mu(\omega' - \varphi') + \sin \omega') \quad [N] \quad (29)$$

όπου:

$$F_{A,T+w} = 72,54 \cdot C \cdot L + F'_T - F_e \quad [N] \quad (30)$$

είναι συνολική οριζόντια δύναμη η οποία ασκείται στον κάθε στύλο και αναλαμβάνεται από το στύλο και το αγκύριο του.

Τέμνουσα δύναμη

$$Q_{A,T+w} = (72,54 \cdot C \cdot L + F'_T - F_e) \cdot (\eta \mu(\omega' - \varphi') - \sin(\omega' - \varphi')) \quad [N] \quad (31)$$

2.3.2.1.2.2. Φόρτιση στην αγκύρωση των στύλων

Η συνολική δύναμη η οποία ασκείται στο κάθε αγκύριο είναι:

$$F_{dwy} = N_{A,T+w} \cdot \eta \mu(\omega' - \varphi') + Q_{A,T+w} \cdot \sin(\omega' - \varphi') \quad (32)$$

2.3.2.2. Ακραίοι στύλοι

Σε κάθε άκρο των ακραίων γραμμών θα τοποθετηθούν δύο στύλοι, για την παραλαβή αντίστοιχα των φορτίσεων κατά τις διευθύνσεις x-x και y-y. Ο πρώτος θα είναι ίδιος με τους ακραίους στύλους των μεσαίων γραμμών και ο δεύτερος ίδιος με τους μεσαίους στύλους των ακραίων γραμμών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον πίνακα 2 δίδονται οι τιμές των δράσεων για τις διάφορες κατηγορίες στύλων, για τα δεδομένα του πίνακα 1, για δύναμη προέντασης των τενόντων $F_T = 5000 \text{ N}$, για κατασκευές που γίνονται στο εσωτερικό της χώρας.

Πίνακας 2. Οι φορτίσεις στις κεφαλές των στύλων για δένδρωςεις καλλιέργειες στην ενδοχώρα

Είδος προστασίας : Αντιχαλαζική				
Μεσαία Γραμμή				
Ακράιοι στύλοι	x-x	$N_{A,T+w} = 11287,47 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 2476,18 \text{ N}$	
	y-y	$N_{A,T+w} = 11287,47 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 111,54 \text{ N}$	
Μεσαίοι στύλοι	x-x	$N_{A,T+w} = 10443,15 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 0$	
	y-y	$N_{A,T+w} = 10443,15 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 361,56 \text{ N}$	
Ακραία Γραμμή				
Ακράιοι στύλοι	x-x	$N_{A,T+w} = 11287,47 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 2476,18 \text{ N}$	
	y-y	$N_{A,T+w} = 10443,15 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 592,53 \text{ N}$	
Μεσαίοι στύλοι	x-x	$N_{A,T+w} = 10443,15 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 0,00$	
	y-y	$N_{A,T+w} = 10443,15 \text{ N}$	$Q_{A,T+w} = 592,53 \text{ N}$	

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένας μεθοδικός τρόπος υπολογισμού των φορτίσεων των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας των δένδρωδών καλλιιεργειών.

Οι δράσεις, που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των υπόψη κατασκευών, είναι η ανεμοφόρτιση και η προένταση των τενόντων.

Για τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες προκύπτουν ανάλογες σχέσεις αν αντί των σχέσεων 11 και 12 χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις 9 και 10.

Οι σχέσεις 19 έως 32, που προέκυψαν, είναι γενικές και μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές με οποιαδήποτε γεωμετρία, σε κάθε περιοχή της ενδοχώρας, αρκεί να επιλεγούν κάθε φορά οι τιμές των γεωμετρικών και κλιματολογικών δεδομένων της εγκατάστασης και οι τιμές των δυνάμεων προέντασης των τενόντων. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν για στύλους από οποιοδήποτε υλικό ήτοι σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο.

Οι υπόψη σχέσεις έχουν επιλυθεί με τη δημιουργία απλών φύλλων Excel τα οποία ενσωματώνονται στη συνέχεια ως υπορουτίνα στο συνολικό πρόγραμμα της μελέτης διαστασιολόγησης των στύλων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περιοδικά

Biassoulis D, Mistriotis A, Eleftherakis D, 2007a. Mechanical behaviour and properties of agricultural HDPE nets, Part I – testing methods. Polymer Testing, 26, 822–832.

Biassoulis D, Mistriotis A, Eleftherakis D 2007b. Mechanical behaviour and properties of agricultural HDPE nets, part II – analysis. Polymer Testing, 26, 970 – 984.

Biassoulis D, Mistriotis A, 2010. Integrated structural design methodology for agricultural protecting structures covered with nets. Biosystems Engineering, 105, 205 – 220.

Κανονισμοί

EN 1991. Eurocode 1: Actions on structures, General actions. Part 1-1: Densities, self-weight, imposed loads for buildings, CEN, April 2002, Part 1- 3: Snow loads, CEN, July 2003, Part 1- 4: Wind actions, CEN, April 2005, Part 1-5: Thermal actions, CEN, Nov. 2003.

ΕΛ.Γ.Α., 2012. Προδιαγραφές εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής και αντιβροχικής προστασίας καρποφόρων δένδρων και θάμνων, σελ. 9, Αθήνα.

Μονογραφίες

Θεοχάρης, Μ., 2000. Η εφαρμογή των Ευρωκώδικων στη μελέτη των Ελληνικών θερμοκηπίων, Μεταπτ. Διατρ., Τμ. Γεωπ. Φυτ. και Ζωικ. Παρ/γής Παν/μίου Θεσσαλίας, Βόλος, σελ. 215.

Μ. Θεοχάρης, 2012. Υπολογισμός των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής και αντιβρο-χικής προστασίας στην Ελλάδα, Άρτα, σελ. 254.

Πρακτικά Συνεδρίων

Θεοχάρης, Μ., 2000. Η ανεμοφόρτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, Πρακτ. 2ου Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν., Βόλος, σελ. 406-414.

Μ. Θεοχάρης, Χ. Μυριούνης και Α. Σιάνου, 2011. Οι φορτίσεις των θερμοκηπιακών κατασκευών στην Ελλάδα σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, Πρακτ. 7ου Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν., Κωδ. Εργασ. 5.1, Αθήνα.

Β. Μπουγά¹, Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος² και Π. Γρουμπός¹

¹Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα Τ.Κ. 26500, e-mail: v.k.bouga@ece.upatras.gr και groumpos@ece.upatras.gr

²Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής, Πάτρα, Τ.Κ. 26500 e-mail: yiantrip@physics.upatras

Τα θερμοκήπια παρέχουν ένα κατάλληλο περιβάλλον για την εντατική παραγωγή διαφόρων ποικιλιών φυτών και σχεδιάζονται ώστε να ελέγχεται το μικροκλίμα τους, για την λήψη υψηλότερης ποιοτικά και ποσοτικά παραγωγής και την αύξηση του οικονομικού οφέλους του παραγωγού. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών και την παραγωγή ποικίλουν και πιο σημαντικές είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η συγκέντρωση CO₂ στον αέρα και η υγρασία και θερμοκρασία του εδάφους. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών υπήρξε προσπάθεια για την επίτευξη του κατάλληλου κλίματος εντός των θερμοκηπίων και την μοντελοποίηση της παραγωγής, για την εξομείωση, έλεγχο και βέλτιστη διαχείριση της όλης διαδικασίας. Όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα των συστημάτων τόσο και η θεωρητική τους προσέγγιση γίνεται πιο δύσκολη. Μια νέα θεωρητική προσέγγιση στη μοντελοποίηση πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων είναι τα Ασαφή Γνωστικά Δίκτυα (ΑΓΔ). Στο άρθρο αυτό χρησιμοποιείται για πρώτη φορά η θεωρία των ΑΓΔ για την μοντελοποίηση ενός θερμοκηπίου. Αναπτύσσεται ένα γενικευμένο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιήσει όλες ή κάποιες από τις παραμέτρους, ανάλογα την εφαρμογή. Έτσι, ο αριθμός των κόμβων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο προτεινόμενο νέο μοντέλο, μπορεί να ποικίλλει ώστε να μπορούν να αναλυθούν και μελετηθούν διαφορετικά συστήματα θερμοκηπίων. Θα παρουσιαστεί το νέο μοντέλο θερμοκηπίων, κάνοντας χρήση των ΑΓΔ και διεξοδικά αποτελέσματα προσομοιώσεων από αυτά..

Λέξεις κλειδιά: θερμοκήπιο, φωτοσύνθεση, έξυπνα συστήματα, ασαφή γνωστικά δίκτυα

MODELING GREENHOUSES USING FUZZY COGNITIVE MAPS

V. Bouga¹, Y.Tripanagnostopoulos² and P. Groumpos¹

¹University of Patras, Department of Electrical and Computer Engineering, Patras 26500, e-mail: v.k.bouga@ece.upatras.gr and groumpos@ece.upatras.gr

² University of Patras, Department of Physics, Patras 26500, e-mail: yiantrip@physics.upatras

Greenhouses provide a suitable environment for the intensive production of different varieties of plants and are designed in order to control the microclimate for obtaining higher quality and quantity of production and increase the economic benefit of the producer. The parameters affecting plant growth and production vary and the most important of them are the intensity of solar radiation, air temperature, relative humidity, CO₂ concentration in the air and moisture and soil temperature. During the last two decades there has been effort to achieve the appropriate climate within greenhouses and modeling production, for the simulation, control and optimal management of the entire process. As the complexity of such systems increases their theoretical approach becomes more difficult. A new theoretical approach to modeling complex dynamic systems is Fuzzy Cognitive Maps (FCMs). In this article the theory of FCMs is used for the first time for modeling a greenhouse. A general model is being developed that can use all or some of the parameters, depending on the application. The number of nodes which can be used in the proposed new model may vary so that different systems for greenhouses can be analyzed and studied. The new greenhouse model using FCMs and comprehensive simulation results for these new models are presented.

Key words: greenhouse, photosynthesis, intelligent systems, fuzzy cognitive maps

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός των θερμοκηπίων είναι η δημιουργία ενός σχετικά ελεγχόμενου περιβάλλοντος έτσι ώστε να μπορούν να καλλιεργηθούν φυτά με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, ακόμα και αν οι συνθήκες του συγκεκριμένου τόπου δεν ευνοούν τη συγκεκριμένη καλλιέργεια. Στα θερμοκήπια ρυθμίζονται αρκετοί περιβαλλοντικοί παράγοντες, για να βοηθηθεί η ανάπτυξη των φυτών ενώ οι βασικές διαδικασίες που πρέπει να ελέγχονται για τη βέλτιστη λειτουργία του είναι ο αερισμός και η θέρμανση.

Η κλίμακα ελέγχου παρουσιάζει μια σαφή τάση, από τον έλεγχο του μακροκλίματος στον έλεγχο σε

επίπεδο μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του θερμοκηπίου και ο έλεγχος του περιβάλλοντός του, αντιπροσωπεύουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου η εκμετάλλευση πληροφοριών τόσο για τα φυσικά όσο και για τα τεχνοοικονομικά στοιχεία που εμπλέκονται στην παραγωγή αποτελεί μονόδρομο στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Οι μέθοδοι προσομοίωσης για πρόβλεψη του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, παρέχουν μια γρήγορη, ευέλικτη και επαναλαμβανόμενη μέθοδο έναντι των πειραματικών προβλέψεων.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών υπήρξε προσπάθεια για την επίτευξη του κατάλληλου κλίματος εντός των θερμοκηπίων και τη μοντελοποίηση της παραγωγής, για την εξομείωση, έλεγχο και βέλτιστη διαχείριση της όλης διαδικασίας. Σύγχρονα πολύπλοκα συστήματα οποιασδήποτε φύσης, με δυσκολία μπορούν να μοντελοποιηθούν, να αναλυθούν ή/και να ελεγχθούν χωρίς την επαρκή χρήση της θεωρητικής προσέγγισής τους. Η πολυπλοκότητα και αβεβαιότητα των σύγχρονων και πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων καθιστά την ανάλυσή τους συνυφασμένη με τη διαχείριση της γνώσης των εμπειρογνομώνων και την προσομοίωση των μοντέλων ελέγχου. Όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα των συστημάτων τόσο και η θεωρητική τους προσέγγιση γίνεται πιο δύσκολη. Μια νέα θεωρητική προσέγγιση στη μοντελοποίηση πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων είναι τα Ασαφή Γνωστικά Δίκτυα (ΑΓΔ), τα οποία είναι μια συμβολική αναπαράσταση για την περιγραφή και τη μοντελοποίηση του συστήματος. Τα ΑΓΔ αποτελούνται από κόμβους, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές παραμέτρους που επηρεάζουν το σύστημα και επιπλέον οι κόμβοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αποτυπώνοντας έτσι την δυναμική του συστήματος.

Στο άρθρο αυτό χρησιμοποιείται για πρώτη φορά η θεωρία των ΑΓΔ για τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος ενός θερμοκηπίου. Αναπτύσσεται ένα γενικευμένο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιήσει όλες ή κάποιες από τις παραμέτρους, ανάλογα την εφαρμογή. Θα παρουσιαστεί το νέο μοντέλο θερμοκηπίων κάνοντας χρήση των ΑΓΔ καθώς επίσης και διεξοδικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για αυτά τα νέα μοντέλα. Ως παράμετρος ένδειξης της παραγωγής δηλαδή ως έξοδος του συστήματος ελήφθη η φωτοσύνθεση των φυτών ύστερα από εκτενή συζήτηση με εμπειρογνώμονες του θέματος.

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.

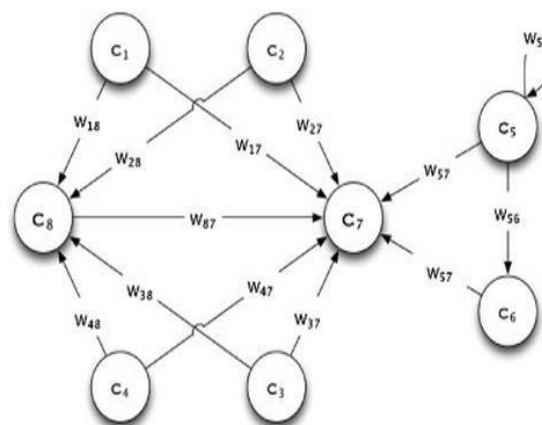
Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για τη μοντελοποίηση του μικροκλίματος των θερμοκηπίων. Οι περισσότεροι ερευνητές επικεντρώθηκαν σε μια μοναδική γεωγραφική περιοχή και σε ένα περιορισμένο και συγκεκριμένο είδος κατασκευής ή μέσω τροποποίησης των συνθηκών του κλίματος του θερμοκηπίου Baptista, F. J. (2007). Μια προσπάθεια για μοντελοποίηση του περιβάλλοντος ενός θερμοκηπίου η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε διαφορετικά κατασκευαστικά μοντέλα και σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε από τους Fitz-Rodríguez et al. (2010) για εκπαιδευτικούς κατευθύνθηκαν και οι B.H.E Vontour et al.(2011) οι οποίοι στηριζόμενοι στα μοντέλα των Bot (1983) και De Zwart (1996) ανέπτυξαν ένα πιο γενικό μοντέλο το οποίο και εφάρμοσαν σε τρία διαφορετικά είδη κλίματος και κατάφεραν να προβλέψουν με σχετικά καλή ακρίβεια το μικροκλίμα του θερμοκηπίου στις περισσότερες περιπτώσεις. Λόγω της μη γραμμικότητας του

περιβάλλοντος ενός θερμοκηπίου έχει γίνει εφαρμογή των Νευρωνικών Δικτύων στη μοντελοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου Ferreira et al. (2002). Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετοί ερευνητές στράφηκαν στον ασαφή έλεγχο προκειμένου να μοντελοποιήσουν και να ελέγξουν το κλίμα στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου Castaneda-Miranda et al.(2006).

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.

Τα Ασαφή Γνωστικά Δίκτυα (ΑΓΔ) προήλθαν ως συνδυασμός ιδεών και μεθόδων της ασαφούς λογικής και των νευρωνικών δικτύων [Kosko B. (1986)].

Τα ΑΓΔ μπορούν να απεικονιστούν σχηματικά με ένα δίκτυο το οποίο αποτελείται από κόμβους που είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους με προσημασμένες συνδέσεις. Κάθε μία από αυτές τις συνδέσεις φέρει ένα βάρος διασύνδεσης. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις έννοιες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του συστήματος και συνδέονται μεταξύ τους με σταθμισμένα τόξα που αντιπροσωπεύουν τις αιτιατές διασυνδέσεις που υπάρχουν μεταξύ των κόμβων-έννοιών. Τα ΑΓΔ έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων [Groumpos and Stylios (2000), Stylios and Groumpos(2004)]. Στο Σχήμα 1 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η γραφική απεικόνιση των ασαφών Γνωστικών Δικτύων:



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση των Ασαφών Γνωστικών Δικτύων.

Η αριθμητική τιμή του βάρους κάθε διασύνδεσης W_{ij} μεταξύ των κόμβων C_i και C_j δείχνει το βαθμό που συσχετίζεται η τιμή της μεταβλητής του ενός κόμβου, με τον υπολογισμό της μεταβλητής του αλληλοσυνδεδεμένου κόμβου. Η αριθμητική τιμή κάθε βάρους διασύνδεσης W_{ij} ανήκει στο διάστημα $[-1,1]$ και υποδεικνύεται από τους ειδικούς και έμπειρους γνώστες του εξεταζόμενου συστήματος. Θεωρείται ότι δεν μπορεί να υπάρχει αιτιατή σχέση μεταξύ ενός κόμβου και του εαυτού του και συνεπώς $W_{ii}=0$. Επίσης οι εμπειρογνώμονες είναι υπεύθυνοι για την περιγραφή των λεκτικών μεταβλητών, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε αριθμητικές τιμές. Έτσι οι

κόμβοι παίρνουν τιμές μεταξύ [0,1]. Όταν το Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο αναπτυχθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή και προσομοίωση του συστήματος, τη συμπεριφορά του οποίου μοντελοποιεί. Για να υπολογιστεί η τιμή της μεταβλητής κάθε κόμβου σε κάθε βήμα προσομοίωσης χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$A_i^t = f\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N A_j^{t-1} \cdot W_{ji} + A_i^{t-1}\right) \quad (1)$$

Το A_i^{t-1} είναι η τιμή του κόμβου C_i τη χρονική στιγμή $t-1$, και το A_i^t είναι η τιμή του κόμβου C_i τη χρονική στιγμή t . Έτσι το Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο οδηγείται ομαλά στο επιθυμητό σημείο ισορροπίας. Επίσης με αυτό τον τρόπο γίνεται μια ομαλή μετάβαση από τη μια τιμή στην άλλη, αφού ο κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από μνήμη ενός βήματος.

Η συνάρτηση συμπίεσης f που θα επιλεγεί, εξαρτάται από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τους κόμβους. Η πιο συνηθισμένη συνάρτηση συμπίεσης είναι η σιγμοειδής που έχει την παρακάτω μορφή:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

όπου το λ καθορίζει την κύρτωση της σιγμοειδούς συνάρτησης f και είναι πάντα θετικό.

4. ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.

Σε αυτή την ενότητα το Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο για ένα θερμοκήπιο έχει κατασκευαστεί. Το σύστημά μας θα έχει έξι κόμβους (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6) και έναν κόμβο-έξοδο που είναι η φωτοσύνθεση (C_7):

- C_1 : Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
- C_2 : Τεχνητή θέρμανση
- C_3 : Κίνηση αέρα
- C_4 : Θερμοκρασία
- C_5 : Υγρασία
- C_6 : CO_2
- C_7 : Φωτοσύνθεση

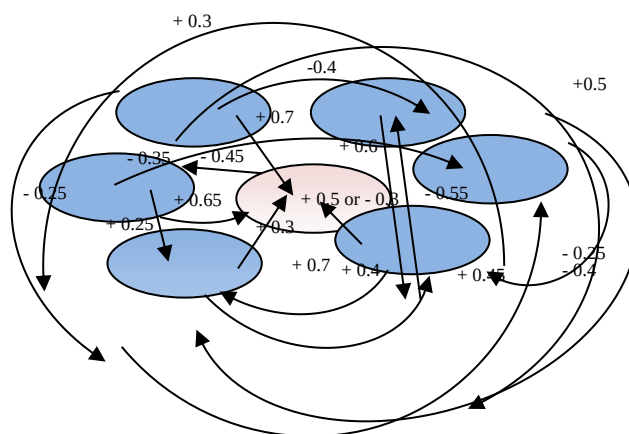
Όπως έχει αναφερθεί η φωτοσύνθεση αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα ένδειξης της ανάπτυξης των φυτών και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ως έξοδος. Η τιμή της εξόδου τείνει στη μονάδα όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της φωτοσύνθεσης.

Τα βάρη των διασυνδέσεων έχουν υπολογιστεί ύστερα από τη συμβολή ενός εμπειρογνώμονα ο οποίος κατέθεσε την άποψή του για το πώς ο κάθε κόμβος επηρεάζει τον άλλο αλλά και την έξοδο του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκε η μήτρα των βαρών διασύνδεσης και τα βάρη δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -0.4 & 0 & +0.5 & -0.25 & 0 & +0.7 \\ 0 & 0 & 0 & +0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.25 & -0.4 & +0.3 & 0 \\ 0 & -0.55 & 0 & 0 & +0.7 & 0 & -0.3(or +0.5) \\ 0 & 0 & 0 & +0.45 & +0.4 & 0 & +0.3 \\ 0 & 0 & -0.35 & 0 & +0.25 & 0 & +0.65 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.45 & 0 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 1: Πίνακας βαρών διασύνδεσης

Το αρχικό Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο με τις τιμές των βαρών δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2: Το Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο

Το μοντέλο του Σχήματος 2 θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη παράγραφο για να προβλεφθεί η φωτοσύνθεση εισάγοντας δεδομένα που δόθηκαν από θερμοκηπιακούς καλλιεργητές της Δυτικής Ελλάδας.

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνθηκών που επικρατούν στο θερμοκήπιο θα προσομοιωθούν προκειμένου να διαπιστώσουμε το ποσοστό της φωτοσύνθεσης που θα έχουμε τελικά.

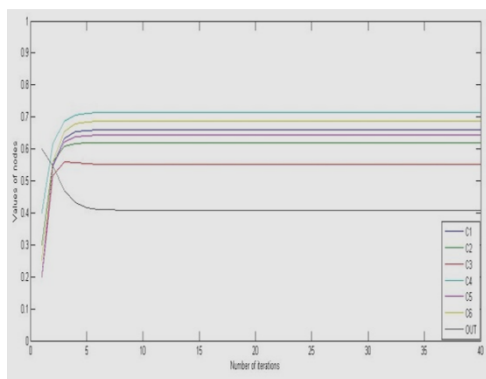
1^η περίπτωση: Υποθέτουμε πως οι συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο είναι οι παρακάτω:

C1	0.2/1 → Very Low
C2	0.3/1 → Low
C3	0.2/1 → Very Low
C4	0.4/1 → Medium
C5	0.2/1 → Very Low
C6	0.25/1 → Very Low

Πίνακας 2: Πίνακας με τις τιμές εισόδου για την πρώτη περίπτωση.

Λαμβάνοντας υπόψιν το Ασαφές Γνωστικό Δίκτυο όπως αυτό διαμορφώθηκε ύστερα από τη συμβολή του εμπειρογνώμονά μας πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα όπου η τιμή της εξόδου διαμορφώθηκε $C_7=0.4$: Η τιμή αυτή, σύμφωνα με τον

εμπειρογνώμονα, είναι αρκετά ικανοποιητική με δεδομένο το γεγονός ότι οι τιμές των κόμβων αντιστοιχούν σε άσχημες συνθήκες και άρα αναμενόταν χαμηλό ποσοστό φωτοσύνθεσης.



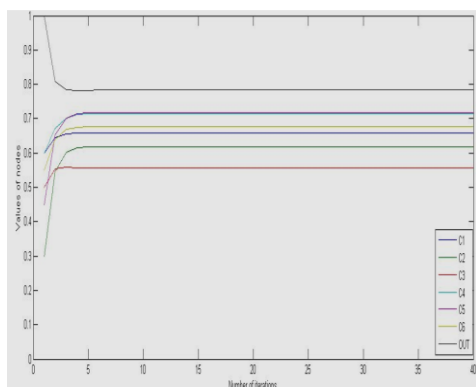
Σχήμα 3: Γραφική παράσταση για την προσομοίωση της 1ης περίπτωσης.

2η περίπτωση: Υποθέτουμε πως οι συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο είναι οι παρακάτω:

C1	0.6/1 → High
C2	0.3/1 → Low
C3	0.5/1 → Medium
C4	0.6/1 → High
C5	0.45/1 → Medium
C6	0.55/1 → Medium

Πίνακας 3: Πίνακας με τις τιμές εισόδου για την δεύτερη περίπτωση.

Προσομοιώνοντας τις παραπάνω συνθήκες πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα με έξοδο την τιμή $C7=0.780$, η οποία λόγω των πολύ καλών συνθηκών του μικροκλίματος του θερμοκηπίου είναι πού καλή και αντιπροσωπεύει υψηλά ποσοστά φωτοσύνθεσης.



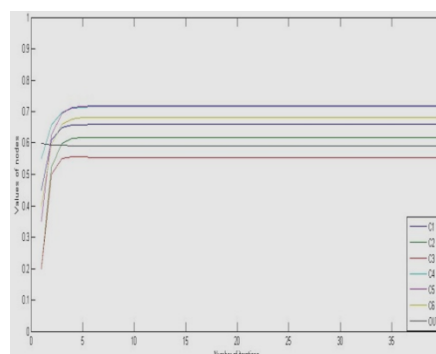
Σχήμα 4: Γραφική παράσταση για την προσομοίωση της 2ης περίπτωσης.

3η περίπτωση: Τέλος, υποθέτουμε πως οι συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο είναι οι παρακάτω:

C1	0.45/1 → Medium
C2	0.2/1 → Low
C3	0.2/1 → Low
C4	0.55/1 → Medium
C5	0.35/1 → Low
C6	0.4/1 → Medium

Πίνακας 4: Πίνακας με τις τιμές εισόδου για την τρίτη περίπτωση.

Πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα και ως έξοδο την τιμή $C7=0.59$, που είναι πολύ λογική, σύμφωνα με τον ειδικό που συμβουλευτήκαμε, καθώς οι τιμές στου κόμβους αντιπροσωπεύουν υποβέλτιστες αλλά όχι χειρίστες συνθήκες.



Σχήμα 5: Γραφική παράσταση για την προσομοίωση της 3ης περίπτωσης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η εργασία δείχνει ότι η χρήση προηγμένων τεχνικών για τη μοντελοποίηση των θερμοκηπίων είναι ικανοποιητική. Για πρώτη φορά τα ΑΓΔ που χρησιμοποιήσαμε δίνουν απλά μοντέλα ενώ οι προσομοιώσεις είναι εύληπτες, εύχρηστες και δίνουν ένα νέο τρόπο μελέτης και ανάλυσης της καλής λειτουργίας του θερμοκηπίου. Πρέπει, παρόλα αυτά, να έχουμε πιο πολλούς εμπειρογνώμονες για καλύτερη προσέγγιση του μοντέλου του μικροκλίματος του θερμοκηπίου οι οποίοι πιθανώς θα πρότειναν επιπλέον κόμβους προκειμένου το μοντέλο μας να γίνει πιο ακριβές. Επίσης, η χρήση αλγορίθμων εκμάθησης είναι αναγκαία για να μελετηθεί η διαδικασία των θερμοκηπίων και εξαχθούν ακριβέστερα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό θα δίνεται η δυνατότητα καλύτερου ελέγχου των τεχνικών μέσων προκειμένου να επιτευχθούν οι καλύτερες δυνατές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτά τα θέματα θα είναι αντικείμενα μελλοντικής μας ερευνητικής προσπάθειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baptista, F. J. 2007. Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection. PhD Thesis, E 'vora University, 180pp.
- Bot, G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD thesis, Wageningen University, 240pp.

- Castaneda-Miranda, R., E. Jr. Ventura-Ramos, R.R. Peniche-Vera and G. Herrera-Ruiz, 2006. Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array. *Biosyst. Eng.*, 94: 165-177
- De Zwart, H. F. 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Wageningen: Wageningen University.
- P.M. Ferreira, E.A. Faria, A.E. Ruano 2002, Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing*, Volume 43, Issues 1–4, March 2002, Pages 51–75
- Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G. A., Tignor, M. E., Wilson, S. B., & McMahon, M. 2010. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: a web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1), 105e116.
- P.P. Groumpos, C.D. Stylios, 2000. Modeling supervisory control systems using fuzzy cognitive maps, *Chaos Solit Fract.* 11(3), 329–336
- Kosko B. (1986) "Fuzzy Cognitive Maps", *Int. Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 24, pp. 65-75,
- C.D. Stylios, P.P. Groumpos, 2004. Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 34, 155–162.
- B.H.E. Vanthoor a,b, C. Stanghellini a, E.J. van Henten a,b,* , P.H.B. de Visser 2011. A methodology for model-based greenhouse design Part 1, *Biosystems Engineering* Volume 110, Issue 4, December 2011, Pages 363–377.

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (IR)

Αγγελική Καυγά¹, Θράσος Πανίδης²

¹Εργαστήριο Τεχνολογίας Θερμοκηπίων, Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας, ΤΕΙ Μεσολογγίου, Νέα Κτήρια, 30200 Μεσολόγγι

²Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πανεπιστημιούπολις, 26504 Πάτρα

Οι δαπάνες για θέρμανση θερμοκηπίων αποτελούν μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του κόστους καλλιέργειας, με σημαντική συνεισφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η θερμότητα παρέχεται στα θερμοκήπια συνήθως μέσω συμβατικών συστημάτων θέρμανσης, και σε περιορισμένη έκταση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για να διατηρηθούν τα φυτά στην βέλτιστη θερμοκρασία καλλιέργειας, το εσωτερικό του θερμοκηπίου πρέπει να θερμανθεί στην ίδια ή υψηλότερη θερμοκρασία, δημιουργώντας ισοθερμοκρασιακό κλίμα σε ολόκληρο το θερμοκήπιο. Το αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι θερμική στρωματοποίηση και σημαντικές απώλειες θερμότητας λόγω της μικρής θερμομονωτικής ικανότητας του καλύμματος. Η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR) για θέρμανση θερμοκηπίων αποτελεί αξιόπιστη εναλλακτική επιλογή. Αυτό διότι θερμαίνεται στην απαιτούμενη θερμοκρασία μόνο η περιοχή του φυτικού θόλου (τοπικό κλίμα), ενώ ο αέρας του θερμοκηπίου παραμένει σε θερμοκρασία 3-5°C χαμηλότερη με συνέπεια η στρωματοποίηση του εσωτερικού αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που παρατηρείται στην θέρμανση με συμβατικά συστήματα. Γι' αυτό το λόγο, οι ενεργειακές απώλειες από την δομή του θερμοκηπίου μειώνονται σημαντικά λόγω μείωσης των απωλειών με συναγωγή και ακτινοβολία από το κάλυμμα και λόγω διαφυγών, καταλήγοντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 40-50% (ψυχρό θερμοκήπιο). Η υπάρχουσα τεχνολογία επιτρέπει πλέον αποτελεσματική εφαρμογή συστημάτων θέρμανσης υπέρυθρης ακτινοβολίας σε μεγάλης κλίμακας θερμοκήπια παραγωγής. Πρόσφατα σύστημα υπέρυθρης ακτινοβολίας εφαρμόστηκε σε εμπορικό θερμοκήπιο παραγωγής σποροφύτων. Πεδίο αναφοράς αποτελεί ένα θερμοκήπιο της εταιρείας Γεωπονική Α.Ε. κατασκευασμένο από την ΑΓΡΕΚ Κ. Σαμαντούρος Α.Ε και εξοπλισμένο με υπέρυθρο σύστημα θέρμανσης τροφοδοτούμενο με καύσιμο LPG από την εταιρεία Natural gas, που λειτουργεί στο Κορωπί Αττικής.

Λέξεις κλειδιά: θερμοκήπιο, συστήματα θέρμανσης, υπέρυθρη ακτινοβολία, εξοικονόμηση ενέργειας

GREENHOUSE HEATING WITH INFRA-RED RADIATION (IR) SYSTEMS

Angeliki Kavga¹, Thrassos Panidis²

¹Laboratory of Greenhouse Technology, Department of Greenhouse Crops and Floriculture, Technological Educational Institution of Messolonghi, Nea Ktiria, GR-30200 Messolonghi, Greece

²Laboratory of Applied Thermodynamics, Mechanical Engineering & Aeronautics Department, University of Patras, Panepistimioupolis, GR-26504 Patras, Greece
akavga@teimes.gr, panidis@mech.upatras.gr

Heating constitutes one of the major costs for greenhouse operators with a significant contribution to the environmental footprint. Heat is usually provided in greenhouses through conventional heating systems, and to a limited extent through renewable energy sources. To maintain the optimum temperature in plants cultivation, the interior of the greenhouse must be heated at the same or higher temperature, creating isothermal environment throughout the greenhouse (whole climate). The result of this approach is thermal stratification and significant losses due to the low heat insulating capacity of the greenhouse cover. The use of infrared (IR) for greenhouse heating is a reliable alternative. This is because only the region of the plant canopy is heated to the required temperature (local climate), while the air inside the greenhouse remains at a temperature 3-5 °C lower. As a result, stratification of the air is considerably lower than that observed in conventional heating systems. Therefore energy losses from the structure are significantly reduced due to the reduction of losses by convection and radiation from the cover and due to leakage, resulting in significant energy savings of 40-50% (cold greenhouse). Existing technology enables more efficient application of infrared radiation heating systems in large-scale productive greenhouses. Recently an IR system was applied in a commercial greenhouse producing vegetable seedlings. The reference testbed is a greenhouse manufactured by AGREK K. Samantouros Company, equipped with LPG fired IR radiators by Natural Gas Company, and operated in Koropi, Attica by Geoponiki Company.

Key words: greenhouse, heating systems, infra-red radiation, energy saving

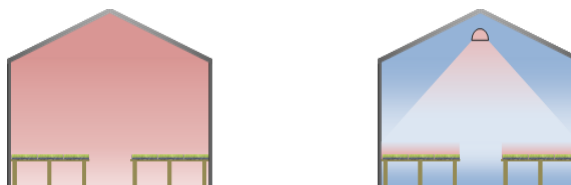
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση θερμοκηπίων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του κόστους καλλιέργειας (De Pascale and Maggio, 2004). Η θερμότητα παρέχεται στα θερμοκήπια

συνήθως μέσω συμβατικών συστημάτων θέρμανσης (σωληνώσεις θερμού νερού, συστήματα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής) (Barzanas et al, 2006). Για να διατηρηθούν τα φυτά στην βέλτιστη θερμοκρασία καλλιέργειας, το εσωτερικό του

θερμοκηπίου πρέπει να θερμανθεί στην ίδια ή υψηλότερη θερμοκρασία, δημιουργώντας ισοθερμοκρασιακό κλίμα σε ολόκληρο το θερμοκήπιο (όλον κλίμα). Το αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι ότι, τα θερμοκήπια λόγω και της κατασκευής τους, παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με την ενέργεια που χρειάζονται τα φυτά (Tiwari, 2003).

Η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR) για θέρμανση θερμοκηπίων μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη εναλλακτική επιλογή σε σχέση με τις προαναφερθείσες συμβατικές μεθόδους θέρμανσης, όπως έχει δείξει προηγούμενη εκτεταμένη μελέτη σε μικρής κλίμακας πειραματικά θερμοκήπια (Kavga et al. 2009, 2012). Σε αυτήν την μελέτη αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη πρόταση για την δημιουργία ενός «ψυχρού θερμοκηπίου» στο οποίο τα φυτά λαμβάνουν απευθείας την ενέργεια που χρειάζονται, προκειμένου να φτάσουν και να διατηρήσουν την επιθυμητή για την ανάπτυξη τους θερμοκρασία, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε σύστημα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία. Σε αυτά τα συστήματα η θερμότητα μεταδίδεται απευθείας από την πηγή στον δέκτη, στην προκειμένη περίπτωση στα φυτά και το έδαφος, που διατηρούνται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα μέσα στο θερμοκήπιο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος μόνο στην περιοχή του φυτικού θόλου (τοπικό κλίμα). Ο αέρας δεν θερμαίνεται απ' ευθείας από την ακτινοβολία, αλλά με συναγωγή λόγω της επαφής του με τα φυτά και το έδαφος που θερμαίνονται άμεσα (Εικόνα 1). Η στρωματοποίηση του εσωτερικού αέρα (διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους και θερμοκρασίας οροφής) είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που παρατηρείται σε συστήματα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής (Kavga et al, 2009). Γι' αυτό το λόγο, οι ενεργειακές απώλειες από την δομή του θερμοκηπίου μειώνονται σημαντικά λόγω μείωσης των απωλειών με συναγωγή και ακτινοβολία από το κάλυμμα και λόγω διαφυγών, καταλήγοντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 40-50% (Kavga et al, 2012). Επίσης επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της υγρασίας της επιφάνειας των φυτών, γεγονός που βοηθά στην μείωση της εξάπλωσης ασθενειών που είναι σοβαρότατο πρόβλημα εντός των θερμοκηπίων (Teitel et al, 2000).



Εικόνα 1: Διαφορά συμβατικών συστημάτων και συστημάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σήμερα η υπάρχουσα τεχνολογία επιτρέπει πλέον αποτελεσματική εφαρμογή συστήματος θέρμανσης υπέρυθρης ακτινοβολίας σε μεγάλης κλίμακας θερμοκήπια παραγωγής.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή συστήματος υπέρυθρης θέρμανσης σε εμπορικό θερμοκήπιο παραγωγής σποροφύτων. Πεδίο αναφοράς αποτελεί ένα τέτοιο θερμοκήπιο της εταιρείας Γεωπονική Α.Ε., κατασκευασμένο από την ΑΓΡΕΚ Κ. Σαμαντούρος Α.Ε και εξοπλισμένο με υπέρυθρο σύστημα θέρμανσης τροφοδοτούμενο με καύσιμο LPG από την εταιρεία Natural gas, που λειτουργεί στο Κορωπί Αττικής

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο "MULTISPAN" (πλάτος 12.80 m, άνοιγμα αψίδων 6.40m, ύψος ορθοστάτη 3.00m, ύψος κορφιά 4.30m, μήκος 66m) χρησιμοποιείται ως πειραματικό πεδίο εφαρμογής. Η συνολική επιφάνεια εδάφους (Αρ) είναι 845 m², η επιφάνεια καλύμματος 1401 m² και ο όγκος (V) 3085 m³. Ο σκελετός αποτελείται από χαλύβδινα κατασκευαστικά στοιχεία, διαφόρων διατομών σύμφωνα με Ευρωπαϊκές προδιαγραφές. Η κάλυψη της οροφής γίνεται από διπλό φιλμ πολυαιθυλενίου PE, με στρώμα αέρος, πάχους 180 μm, ενώ περιμετρικά το θερμοκήπιο και μέχρι ύψος 1.20 m είναι κατασκευασμένο από σκληρό πλαστικό (PVC). Το θερμοκήπιο χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη σποροφύτων τα οποία καλλιεργούνται σε πάγκους καλλιέργειας 1.0 m πάνω από το έδαφος του θερμοκηπίου (εικόνα 2).

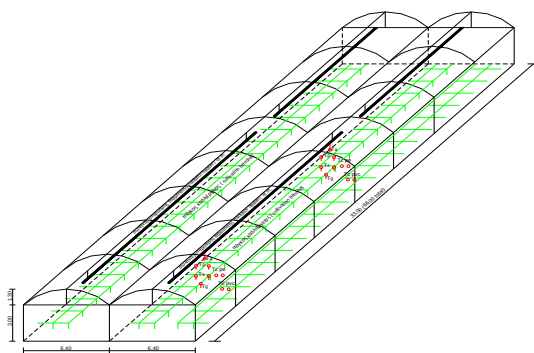


Εικόνα 2: Παραγωγικό θερμοκήπιο σποροφύτων

Σύμφωνα με τις εκτιμώμενες μέγιστες ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου, το θερμοκήπιο εξοπλίστηκε με υπέρυθρο σύστημα θέρμανσης τροφοδοτούμενο με καύσιμο LPG. Το σύστημα αποτελείται από (6) υπέρυθρους σωλήνες, τύπου INFRA MONOTUBO 18MI, θερμικής ικανότητας 45KW

έκαστος, τοποθετημένοι σε ύψος 3.0 m από την επιφάνεια των φυτών (εικόνα 3). Για τις παρούσες καλλιέργειες σποροφύτων η επιθυμητή θερμοκρασία ορίστηκε σε $T_{plants}=16\pm1^{\circ}\text{C}$, και η λειτουργία του συστήματος καθοριζόταν από θερμοστάτη περιοχής.

Οι παράμετροι του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο που καταγράφονται από θερμοζεύγη, είναι οι θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις στην επιφάνεια των φυτών καθώς και στο έδαφος καλλιέργειας, στον αέρα του θερμοκηπίου, στο έδαφος κάτω από τον πάγκο καλλιέργειας, και στην επιφάνεια του εσωτερικού και εξωτερικού πλαϊνού καλύμματος και του καλύμματος οροφής (εικόνα 4). Επίσης καταγράφονται η σχετική υγρασία του θερμοκηπίου (RH) και οι ροές ακτινοβολίας.



Εικόνα 3: 3D κάτοψη του θερμοκηπίου

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο 1/6 του θερμοκηπίου και σε φυτική επιφάνεια 120 m² που καλυπτόταν θερμαντικά από τον ένα από τους 6 σωλήνες υπέρυθρης ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 2 σταθμοί πειραμάτων, τοποθετημένοι σε απόσταση 3m από τις άκρες του σωλήνα θέρμανσης. Σε αυτούς τους 2 σταθμούς πειραμάτων τα θερμοζεύγη (τύπου T, Cu(+)/Constantan(-), διαμέτρου 0.5 mm), τοποθετήθηκαν ως εξής (εικόνα 3):

- 2 θερμοζεύγη στην επιφάνεια των φυτών (στους πάγκους καλλιέργειας) για να μετράται η θερμοκρασία των φυτών (T_{plants})
- 2 θερμοζεύγη στις αντίστοιχες θέσεις 1cm μέσα στο pot καλλιέργειας για να μετράται η θερμοκρασία του εδάφους καλλιέργειας (T_{soil})
- 1 θερμοζεύγος στον αέρα πάνω από το κέντρο του πάγκου καλλιέργειας και στην ενδιάμεση απόσταση πάγκου καλλιέργειας και συστήματος θέρμανσης (1.5 m) για να μετράται η θερμοκρασία του αέρα (T_{air})
- 1 θερμοζεύγος στην ίδια θέση κάτω από τον πάγκο καλλιέργειας 10 cm πάνω από το έδαφος για να μετράται η θερμοκρασία του εδάφους (T_{ground})
- 2 θερμοζεύγη εντός και εκτός του πλαϊνού καλύμματος 20 cm από το ύψος των φυτών για να μετράται η θερμοκρασία του περιμετρικού PVC καλύμματος (T_{cover_PVC})
- 2 θερμοζεύγη εντός και εκτός του καλύμματος οροφής του θερμοκηπίου για να μετράται η

θερμοκρασία του PE film καλύμματος οροφής (T_{cover_PE})



Εικόνα 4: Τομή πειραματικού σταθμού θερμοκηπίου

Οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες καταγράφονται στον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται πολύ κοντά στο θερμοκήπιο (εικόνα 5) και είναι εξοπλισμένος με τους κατάλληλους αισθητήρες σε ύψος 2.50 m από το έδαφος. Αυτές οι παράμετροι είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία (probe MP101A), η ταχύτητα του ανέμου (Anemometer A100K), η θερμοκρασία ουρανού (Pyrgometer CGR3), η ηλιακή ακτινοβολία (SP-Lite) και το ύψος της βροχόπτωσης (Rain gauge 52203).

Οι παράμετροι κεντρικού ενδιαφέροντος είναι η θερμοκρασία φυτών, εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, η θερμοκρασία εδάφους καλλιέργειας φυτών, η θερμοκρασία εδάφους κάτω από τον πάγκο καλλιέργειας, η θερμοκρασία καλύμματος, η θερμοκρασία ουρανού, και η ταχύτητα ανέμου. Η προσοχή εστιάζεται στην θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της νύχτας και πιο συγκεκριμένα στην θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος, όταν το σύστημα θέρμανσης αυτόματα ανοίγει και κλείνει. Επειδή οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν με τον χρόνο, τα δεδομένα σαρώνονται κάθε λεπτό, υπολογίζονται οι μέσοι όροι κάθε 10/λεπτό και καταγράφονται σε 24ωρη βάση στον Datalogger του σταθμού. Υπολογίζονται οι μέσες ολονύχτιες τιμές από τις αντίστοιχες χρονικές ακολουθίες βασιζόμενες στο διάστημα μεταξύ της απότομης αλλαγής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ανατολή και στην δύση του ήλιου καθώς και την αποκατάσταση σταθερών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου.



Εικόνα 5: Ο μετεωρολογικός σταθμός

Το σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης που χρησιμοποιείται αποτελείται από (6) υπέρυθρους σωλήνες, τύπου INFRA MONOTUBO 18MI, θερμικής

ικανότητας 45KW έκαστος, που είναι τοποθετημένοι σε ύψος 3.0 m από την επιφάνεια των φυτών (εικόνα 6). Το κάθε σωληνωτό κάτοπτρο τύπου INFRA σχεδιάζεται και κατασκευάζεται από την SYSTEMA S.R.I. (www.Natural-gas.gr) και αποτελείται από:

- Καυστήρα BAF που λειτουργεί με μίγμα αερίου και αέρα ωθούμενο από ανεμιστήρα, κλειστού τύπου, θερμικής ισχύος 45KW
- Ανεμιστήρα απαγωγής με κινητήρα κλάσης H
- Υπέρυθρο σώμα θέρμανσης, σύστημα σωληνώσεων θερμαινόμενο από τα αέρια καύσης σε θερμοκρασίες που εκπέμπουν στο υπέρυθρο φάσμα.
- Κάτοπτρα ανάκλασης για να εκτρέπουν την ακτινοβολία από τους σωλήνες που βρίσκονται κάτωθεν, με υψηλό συντελεστή ανάκλασης στις υπέρυθρες συχνότητες.



Εικόνα 6: Το σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης (IR)

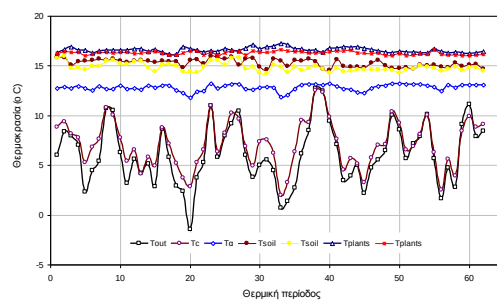
Τα πειράματα διεξήχθησαν κατά την διάρκεια της θερμικής περιόδου. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατεγράφησαν για περίοδο 62 ημερών της παραγωγικής λειτουργίας του θερμοκηπίου.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

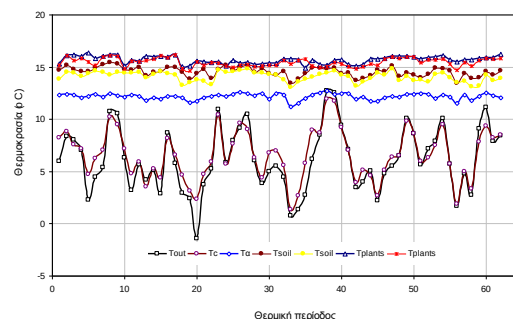
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τυπικά αποτελέσματα των μεταβολών της θερμοκρασίας του αέρα, του εδάφους κάτω από τον πάγκο καλλιέργειας, και του καλύμματος του θερμοκηπίου, δίνοντας σαφή εικόνα για το πώς λειτουργεί στην πράξη η υπέρυθρη θέρμανση. Το όφελος της υπέρυθρης θέρμανσης σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την επιθυμητή θερμοκρασία στο φυτικό θόλο ενώ ο εσωτερικός αέρας του θερμοκηπίου διατηρείται σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στα σχήματα 7 και 8 απεικονίζεται η θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου στην διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Οι συνολικές νύχτες που εμφανίζονται στον άξονα x απεικονίζονται με χρονική αλληλουχία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα διαγράμματα είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος, η θερμοκρασία του εδάφους, η θερμοκρασία των φυτών και η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος. Πρόκειται για τις μέσες τιμές θερμοκρασίας νύχτας που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα αυτής της περιόδου. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από την θερμοκρασία των φυτών, κατά 3 – 4°C, ενώ η θερμοκρασία καλύμματος είναι ακόμα χαμηλότερη και κυμαίνεται από 4 – 11 °C στο PVC πλαϊνό κάλυμμα και από 6 – 13 °C στο PE κάλυμμα οροφής, ακολουθώντας την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Αυτά τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Nelson, 2003)(αναφορά) και δίνουν μια πραγματική εκτίμηση της μείωσης των ενεργειακών απωλειών του θερμοκηπίου που φαίνεται να είναι σημαντική και αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα εφαρμογής της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε παραγωγικά θερμοκήπια.



Εικόνα 7. Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα, εδάφους και καλύμματος του θερμοκηπίου στον πρώτο πειραματικό σταθμό



Εικόνα 8. Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα, εδάφους και καλύμματος του θερμοκηπίου στον δεύτερο πειραματικό σταθμό

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πειραματικές μετρήσεις σε παραγωγικό θερμοκήπιο με την χρήση υπέρυθρης θέρμανσης δείχνουν ότι η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου παραμένει σημαντικά μικρότερη από τη θερμοκρασία στην οποία διατηρούνται τα φυτά, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας 35-45%.

Η θέρμανση του θερμοκηπίου με υπέρυθρη ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάπτυξη των φυτών σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους θέρμανσης και την καλύτερη ομοιομορφία στις διάφορες παρτίδες λόγω της καλύτερης κατανομής της θερμοκρασίας στο φυτικό θόλο.

Στην ρίζα παρατηρείται ικανοποιητική ανάπτυξη, τόσο όσο αφορά την ταχύτητα ανάπτυξης όσο και την εναπόθεση βιομάζας εφόσον το μικροπεριβάλλον γύρω της διατηρείται στην ιδανική θερμοκρασία.

Η θέρμανση με IR ακτινοβολία επιτρέπει τη δημιουργία ζωνών σε επί μέρους τμήματα του θερμοκηπίου, με διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε καλλιέργειας.

Τα οφέλη της θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία δεν περιορίζονται μόνο στην ανάπτυξη του φυτού αλλά και στη μείωση της εμφάνισης ασθενειών στα φυτά. Η θερμότητα που απορροφάται από την επιφάνεια του φύλλου έχει ως αποτέλεσμα την απουσία υγρασίας και κατά συνέπεια μείωση των μυκητολογικών ασθενειών. Γενικότερα η υγρασία του χώρου είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με αντίστοιχα θερμοκήπια που θερμαίνονται επιδαπέδια υπό τις ίδιες καιρικές συνθήκες. Επιπλέον το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα

ρύθμισης διαφορετικής θερμοκρασίας μέσα στο ίδιο θερμοκήπιο εφόσον υπάρχουν παραπάνω από ένα αυτόνομα συστήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bartzanas, T., Tchamitchian, M., and Kittas, C. 2005. Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption. *Biosystems Eng.* 91:487-499.
- De Pascale S., and Maggio A. 2004. Sustainable protected cultivation at Mediterranean climate, perspectives and challenges. *Acta Horticulturae*, 691: 29-42
- Kavga, A., Panidis, Th., Bontozoglou, V., and Pantelakis, S. 2009. Infra-Red Heating of Greenhouses Revisited: An Experimental and Modeling Study. *Trans. ASABE* 52: 1-11.
- Kavga, A., Alexopoulos, G., Bontozoglou, V., Pantelakis, S., & Panidis, Th., 2012. Experimental investigation of the energy needs for a conventionally and an infrared heated greenhouse, *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 789515, 1-16.
- Nelson, V. P. 2003. *Greenhouse operation and management*. 6rd ed. New Jersey: Upper Saddle River.
- Teitel, M., Shklyar, A., Elad, Y., Dikhtyar, V., and Jerby, E. 2002. Development of a microwave system for greenhouse heating, *Acta Horticulturae* 534:189-195.
- Tiwari, G. N. 2003. *Greenhouses technology for controlled environment*. New Delhi: Narosa Publishing House.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΤΩΝ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Αναστασία Δениζοπούλου, Μαρία Παροτσίδου, Βασίλειος Φράγκος, Χρυσούλα Νικήτα-Μαρτζοπούλου
Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση της ροής του αέρα στο εσωτερικό αγροτικών κατασκευών θερμοκηπιακού τύπου. Σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης του ύψους και της θέσης των ανοιγμάτων αερισμού στην διαμόρφωση των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής. Για την προσομοίωση της τυρβώδους ροής κατά τον αερισμό χρησιμοποιήθηκε μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής βασισμένο στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, προσομοιώνεται η ροή μέσα σε αεροσήραγγα ώστε το αριθμητικό πείραμα να υπολογίζεται σε δύο διαστάσεις. Από την στατιστική επεξεργασία των στιγμιαίων αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου προκύπτει η ανάλυση των χαρακτηριστικών μεγεθών της τυρβώδους ροής όσον αφορά στην ένταση της τύρβης και στην μεταβολή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: άμεση αριθμητική προσομοίωση, αερισμός, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, αγροτικές κατασκευές

STUDY OF THE EFFECT OF HEIGHT AND POSITION OF VENTILATION OPENINGS ON THE MICROCLIMATE OF RURAL CONSTRUCTIONS BASED ON TWO DIMENSIONAL NUMERICAL APPROACH

Anastasia Denizopoulou, Maria Parotsidou, Vasileios Fragos, Chrysoula Nikita - Martzopoulou
Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki.
adeniz@agro.auth.gr, mparotsi@agro.auth.gr, fragos@agro.auth.gr, nikita@agro.auth.gr.

In the present paper the numerical simulation of airflow within agricultural constructions is performed. The aim is to study the effect of the height and position of ventilation openings in the formation of turbulent flow characteristics. For simulation purposes of turbulent flow in ventilation a computational fluid dynamics model is used based on solving the Navier-Stokes and continuity equations with the finite element method. Taking the appropriate boundary conditions under consideration, the flow is simulated in the wind tunnel so that the numerical experiment is to be calculated in two dimensions. From the statistical analysis of instantaneous results of the mathematical model results the analysis of the characteristics of the turbulent flow with regard to the turbulence intensity and the variation of the turbulent kinetic energy.

Key words: direct numerical simulation, ventilation, finite element method, rural constructions

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη σωστή ρύθμιση του μικροκλίματος μιας αγροτικής κατασκευής είναι αναμφισβήτητο ο αερισμός. Βασικός στόχος του είναι η επίτευξη (ρύθμιση) της βέλτιστης εσωτερικής θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας καθώς και των επιπέδων συγκέντρωσης αερίων.

Ένα επαρκές σύστημα εξαερισμού καθιστά δυνατή τη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής, τη μείωση της σχετικής υγρασίας, την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ σε θερμοκήπια και τη βελτίωση του χημικού περιβάλλοντος σε κτηνοτροφικές κατασκευές καθώς επίσης και τη μη συσσώρευση αερίων εκπομπών με έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η αμμωνία, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου. Συνεπώς εξασφαλίζεται με το σωστό αερισμό η αποδοτική και συνάμα ποιοτική αγροτική παραγωγή καθώς ένα υγιές περιβάλλον εργασίας και στέγασης, τόσο για τον αγρότη όσο και για τα ζώα.

Ο φυσικός αερισμός επιτυγχάνεται μέσω ανοιγμάτων, τα οποία συνήθως τοποθετούνται στην οροφή και στις πλευρές των αγροτικών κατασκευών θερμοκηπιακού τύπου (Martzopoulou, 2007). Η ροή του αέρα διαμέσου των ανοιγμάτων οφείλεται κυρίως στη διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Αυτή η ροή διαχωρίζεται σε: α) σταθερή κατάσταση, η οποία προκαλείται από στατική πίεση και σχετίζεται με τη μέση ταχύτητα του αέρα και περιγράφεται από την εξίσωση Bernoulli, και σε β) τυρβώδη κατάσταση, που προκαλείται από τις διακυμάνσεις της πίεσης ανέμου και σχετίζεται με την γεωμετρία της αγροτικής κατασκευής.

Η αύξηση του ενδιαφέροντος των ερευνητών για τη διερεύνηση των μεθόδων φυσικού αερισμού των αγροτικών κατασκευών και η αναγκαιότητα διερεύνησης του φαινομένου οδήγησε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν με τη μελέτη της ροής του αέρα γύρω από κατασκευές.

Οι Norton et al. (2007) στην μελέτη τους παρείχαν μια εξαιρετικά εξειδικευμένη ανασκόπηση των τρεχουσών εφαρμογών της ρευστομηχανικής στο σχεδιασμό των συστημάτων αερισμού στις εγκαταστάσεις γεωργικής παραγωγής. Σε γενικές γραμμές υπογραμμίστηκε ο ρόλος που η ρευστομηχανική μπορεί να προσφέρει στην μοντελοποίηση του εσωτερικού περιβάλλοντος των αγροτικών κατασκευών και δόθηκε έμφαση στην ανάγκη για επιπρόσθετη έρευνα επικεντρωμένη όχι μόνο στην παρατήρηση των φαινομένων του αερισμού αλλά και στην ενσωμάτωση των παρατηρήσεων στο σχεδιασμό των αγροτικών εγκαταστάσεων.

Επιπρόσθετα οι Norton et al. (2010) χρησιμοποίησαν την Υπολογιστική Ρευστομηχανική για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης τα οποία περιγράφουν την ομοιογένεια του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός φυσικά αεριζόμενου κτηνοτροφικού κτιρίου ως συνάρτηση της γεωμετρίας του και των διατάξεων αερισμού για τρεις διαφορετικές συνθήκες πλευρικών ανοιγμάτων. Συμπέρασμα της εργασίας τους είναι ότι ο τύπος επένδυσης πρόστεγου, το πορώδες του υλικού και το ύψος των ανοιγμάτων, αποτελούν μεταβλητές σχεδιασμού, προκειμένου να επιτευχθεί η καλή ομοιομορφία σε ένα φυσικά βουστάσιο.

Προκειμένου να αποκτηθεί καλύτερη κατανόηση της πολύπλοκης διαδικασίας φυσικού εξαερισμού μέσα και γύρω από τα κτηνοτροφικά κτίρια, οι De Paere et al. (2012) στα πλαίσια της εργασίας τους διεξήγαγαν μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα σε αεροσήραγγα σε κλίμακα 1:60 μιας σταβλικής εγκατάστασης αγελάδων γαλακτοπαραγωγής με έξι διαφορετικές διατάξεις ανοιγμάτων αερισμού. Σκοπός του πειράματος ήταν η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαφορετικών ανοιγμάτων αερισμού στις κατανομές της ταχύτητας τόσο στο εσωτερικό της κατασκευής όσο και υπήνεμα αυτής.

Επίσης, οι Zhang et al. (2000) προσπάθησαν να προσομοιώσουν τη δισδιάστατη ροή του αέρα, με τη χρήση ενός μοντέλου υπολογιστικής ρευστομηχανικής, μέσα σε πειραματική κατασκευή με συμμετρική γεωμετρία, που αναπαριστούσε μία κτηνοτροφική κατασκευή.

Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να εξαχθούν ευρείας κλίμακας συμπεράσματα για το σχεδιασμό των ανοιγμάτων των αγροτικών κατασκευών θερμοκηπιακού τύπου, βασίστηκε στη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής με δυναμική προσέγγιση μελετώντας τις μεταβολές των χαρακτηριστικών του μικροκλίματος ως προς το χρόνο. Οποιαδήποτε μεταβολή των διαστάσεων και της θέσης των ανοιγμάτων αερισμού επηρεάζει άμεσα ως προς τον χώρο και τον χρόνο, τις παραμέτρους του εσωτερικού μικροκλίματος και κυρίως τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη συγκέντρωση των αερίων ρύπων.

Στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση του ύψους και των θέσεων των ανοιγμάτων αερισμού στη διαμόρφωση του μικροκλίματος εντός μιας αγροτικής κατασκευής με κύριο σκοπό τη δυνατότητα βελτίωσης του μικροκλίματος μέσω του φυσικού αερισμού. Για αυτό το λόγο μελετήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης σε κώδικα Fortran (Fragos et al., 2007, 2012 & Paraskevoudoulou et al., 2011) η δισδιάστατη ροή ανέμου γύρω από συμμετρική κατασκευή με την απευθείας επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας, για αριθμό Reynolds $Re=300$, ο οποίος αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη ταχύτητα $U_0=1$ m/sec στην είσοδο της αεροσήραγγας και για τα δυο διαφορετικά ύψη ανοιγμάτων στα πλαίσια της κατασκευής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Διέπουσες εξισώσεις

Οι αδιαστατοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes (N-S) και συνέχειας που περιγράφουν τη δισδιάστατη, ισοθερμη, τυρβώδη ροή αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό μιας αγροτικής κατασκευής ορίζονται παρακάτω:

α) Εξίσωση κίνησης (εξισώσεις N-S)

β) εξίσωση συνέχειας

$$\nabla U = 0$$

όπου $U=(u,v)$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας για τα ρευστά, u και v είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας για τη x και y διεύθυνση αντίστοιχα, p είναι η πίεση και Re είναι ο αριθμός Reynolds.

2.2. Οριακή και Αρχική συνθήκη

Στην παρούσα εργασία επιβάλλονται οι κατάλληλες οριακές συνθήκες ώστε να προσομοιώνεται η φυσική ροή στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον μιας αγροτικής κατασκευής μέσα σε αεροσήραγγα.

Ο καθορισμός της αρχικής συνθήκης είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που απασχολεί την

ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ &ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΕΙΣΟΔΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	ΕΞΟΔΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ,(u)	0 (συνθήκες μη ολίσθησης)	1 (Ομοιόμορφη ροή)	Ελεύθερη Οριακή συνθήκη
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ,(v)	0 (συνθήκες μη ολίσθησης)	1 (Ομοιόμορφη ροή)	Ελεύθερη Οριακή συνθήκη

υπολογιστική μηχανική των ρευστών. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως αρχική συνθήκη η λύση για αριθμό $Re=1$ που προέκυψε από την επίλυση των

εξισώσεων Navier–Stokes σε σταθερή κατάσταση (Fragos et al., 2007).

Πίνακας 1. Οριακές συνθήκες του υπολογιστικού πεδίου ροής.

Οι μονάδες των παραμέτρων είναι αδιάστατες. Η αδιαστατοποίηση των ταχυτήτων έγινε με βάση την ομοιόμορφη ταχύτητα στην είσοδο της αεροσήραγγας U_0 .

2.3. Υπολογιστικά δεδομένα αριθμητικών πειραμάτων

Τα υπολογιστικά δεδομένα της μελετώμενης εφαρμογής ορίστηκαν με βάση το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη ροών μέσα σε αεροσήραγγες και τα συναφή εργαστηριακά πειράματα για τη μελέτη των επιδράσεων αέρα σε κατασκευές. Η γεωμετρία της υπό μελέτης αγροτικής κατασκευής είναι μεν ορθογωνική αλλά βασίστηκε σε ελεγχόμενη γεωμετρία (test room) που χρησιμοποιήθηκε για εξαγωγή επιστημονικών συμπερασμάτων και από άλλους ερευνητές (Zhang 2000 & Paraskevopoulou 2011).

Πίνακας 2. Υπολογιστικά δεδομένα των αριθμητικών πειραμάτων

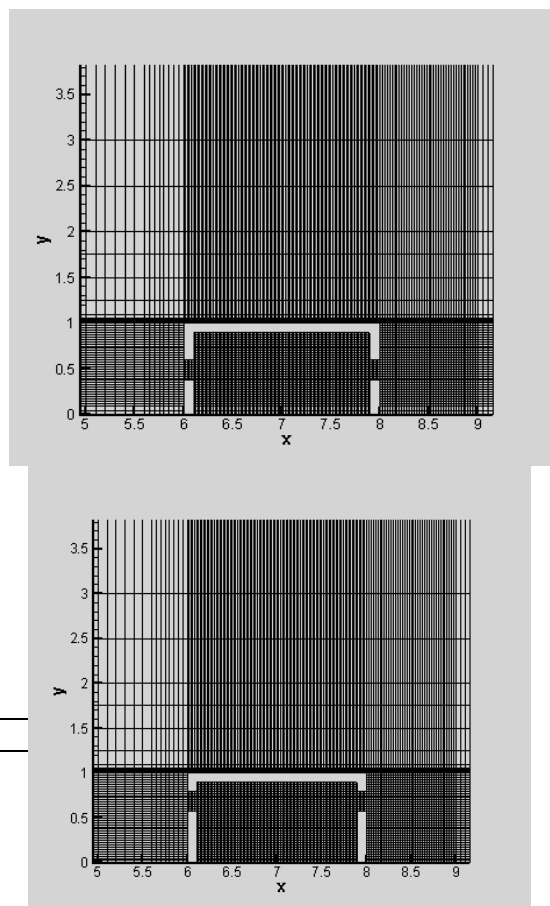
	1 ^η ΔΙΑΤΑΞΗ	2 ^η ΔΙΑΤΑΞΗ
ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	1	1
ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	2	2
ΘΕΣΗ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ	0.375	0.575
ΜΗΚΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	30	30
ΥΨΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	10	10
ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS	300	300

Οι μονάδες των παραμέτρων είναι αδιάστατες. Η αδιαστατοποίηση του μήκους κατά τη x και y διεύθυνση έγινε με βάση το ύψος της κατασκευής h .

2.4. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Για την επίλυση των εξισώσεων μαζί με τις παραπάνω οριακές συνθήκες (Πίνακας 1) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες επίλυσης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων των Fragos et al. (2007) σε γλώσσα προγραμματισμού VISUAL FORTRAN 90/95. Προκειμένου όμως να προσομοιωθεί η ροή στο εσωτερικό και εξωτερικό μιας αγροτικής κατασκευής ο κώδικας αυτός τροποποιήθηκε ώστε να προκύψει η λύση για τη ροή στο εσωτερικό και εξωτερικό μιας ορθογωνίας κατασκευής με ανοίγματα.

Το υπολογιστικό πλέγμα σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακρίβεια και ο ελάχιστος υπολογιστικός χρόνος. Στα Σχήματα 1α και 1β παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα σε ολόκληρο το πεδίο ροής καθώς επίσης και οι λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω και μέσα στην κατασκευή για τις διαφορετικές θέσεις ανοιγμάτων.



Σχήμα 1α. Υπολογιστικό πλέγμα δισδιάστατης προσομοίωσης της ροής του ανέμου κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος 0.575h

Σχήμα 1β. Υπολογιστικό πλέγμα δισδιάστατης προσομοίωσης της ροής του ανέμου κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος 0.375h.

Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων, των κόμβων, των αγνώστων και του χρονικού βήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Από την επίλυση των εξισώσεων προκύπτουν συνολικά 3000 μετρήσεις για τις άγνωστες αδιαστατοποιημένες μεταβλητές u , v , p σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε σε επιτραπέζιο υπολογιστή Intel® Core(TM) i7 CPU 870 @2.93GHz0020 και 4 GB RAM.

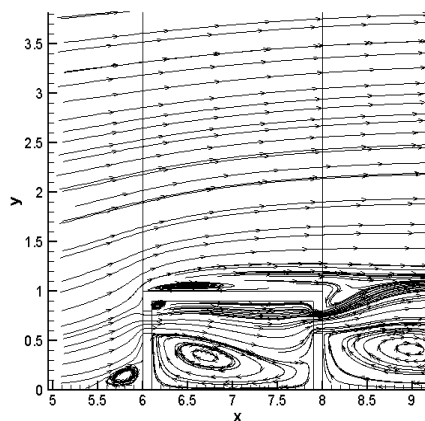
Πίνακας 3. Στοιχεία των υπολογιστικών πεδίων ροής.

	1 ^η ΔΙΑΤΑΞΗ	2 ^η ΔΙΑΤΑΞΗ
ΠΛΗΘΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19735	19990
ΠΛΗΘΟΣ ΚΟΜΒΩΝ	79940	80966
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΑΓΝΩΣΤΩΝ	180115	182425
ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ	0.01	0.01

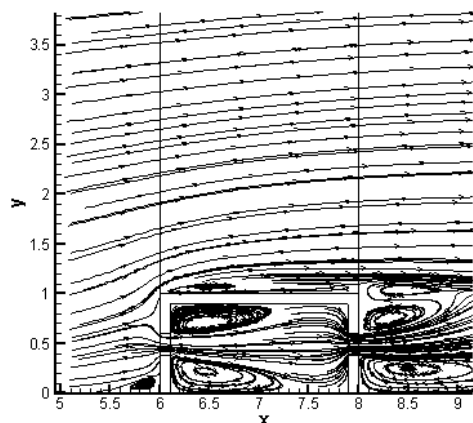
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μέσες Γραμμές Ροής

Στα σχήματα 2α και 2β παρουσιάζονται οι μέσες ως προς το χρόνο γραμμές ροής που προέκυψαν μετά από στατιστική επεξεργασία 3000 υπολογιζόμενων τιμών για κάθε σημείο του χώρου και για χρονική διάρκεια $T = 30$ χρονικές μονάδες.



Σχήμα 2α. Μέσες γραμμές ροής για την διδιάστατη προσομοίωση της ροής του ανέμου κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος $0.575h$.



Σχήμα 2β. Μέσες γραμμές ροής για την διδιάστατη προσομοίωση της ροής του ανέμου κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος $0.375h$.

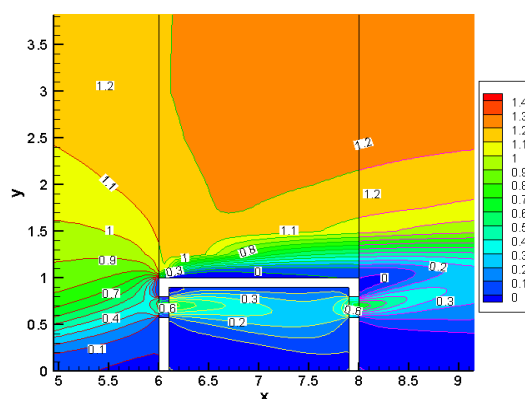
Παρατηρείται από το σχήμα 2α λόγω της θέσης του ανοίγματος σε ύψος $0.575h$, ότι δημιουργείται ένας μεγάλος στροβιλισμός στην κάτω γωνία ανάντη του εσωτερικού περιβάλλοντος της κατασκευής κατά μήκος της κατασκευής μέχρι και την κάτω γωνία κατάντη εντός της κατασκευής.

Επιπρόσθετα υπάρχει ένας πιο έντονος στροβιλισμός στην έξοδο της ροής του αέρα από την κατασκευή στο κατάντη εξωτερικό περιβάλλον λόγω ανακυκλοφορίας αέρα από την εξερχόμενη της κατασκευής ροή.

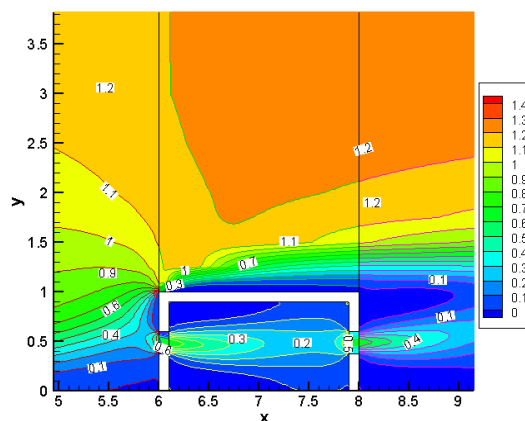
Όπως φαίνεται από το σχήμα 2β και για την θέση του ανοίγματος σε ύψος $0.375h$, δημιουργούνται δυο στροβίλοι στην άνω και την κάτω γωνία στο ανάντη εσωτερικό τοίχωμα της κατασκευής. Η ροή του αέρα εισέρχεται δια μέσου της κατασκευής και κατά την έξοδο της δημιουργούνται μικροί στροβιλισμοί εκατέρωθεν του ανοίγματος στο ανάντη τοίχωμα.

3.2 Οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας

Στα Σχήματα 3α και 3β παρουσιάζεται η κατανομή των οριζόντιων ταχυτήτων του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής και για τις δύο διατάξεις πλαϊνών ανοιγμάτων και για $Re=300$



Σχήμα 3α. Κατανομή της μέσης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος $0.575h$.



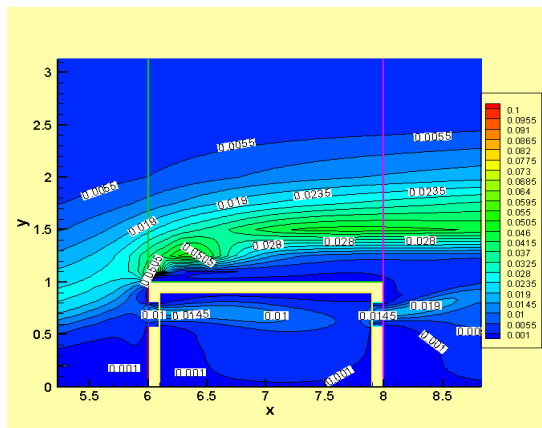
Σχήμα 3β. Κατανομή της μέσης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος $0.375h$.

Παρατηρώντας τα δύο σχήματα 3α και 3β γίνεται αντιληπτό ότι τόσο για την περίπτωση της θέσης του ανοίγματος σε ύψος $0.575h$ όσο και για αυτήν σε ύψος $0.375h$ η μέση οριζόντια ταχύτητα

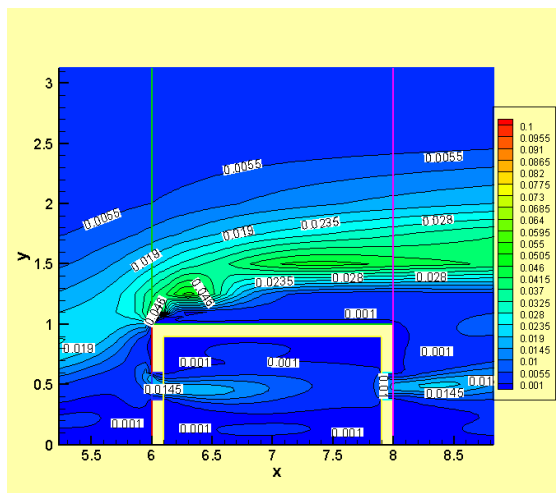
παρουσιάζει υψηλότερες τιμές (1.1) πάνω από την αγροτική κατασκευή και σε ύψος πάνω από το μισό του ύψους της καθώς επίσης και στα ανοίγματα. Στο εσωτερικό της κατασκευής οι υψηλότερες τιμές της μέσης οριζόντιας ταχύτητας και για τις δυο περιπτώσεις παρατηρούνται κυρίως στο μέσο της.

3.3 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (ΤΚΕ) δίνεται από τη σχέση: $TKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$ και απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα και για τις δυο διατάξεις ανοιγμάτων.



Σχήμα 4α. Τυρβώδης κινητική ενέργεια κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος 0.575h.



Σχήμα 4β. Τυρβώδης κινητική ενέργεια κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της ορθογώνιας κατασκευής με πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος 0.375h.

Από την αριθμητική μελέτη που διεξήχθη και την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, όπως απεικονίζονται στα σχήματα 4α και 4β, η μέγιστη τιμή για την τυρβώδη κινητική ενέργεια παρατηρείται και για τις δυο περιπτώσεις πλαϊνών ανοιγμάτων στην άνω αιχμή αποκόλλησης

της ροής ανάντη του εξωτερικού τοιχώματος της κατασκευής (0.0505 και 0.046 για πλαϊνά ανοίγματα σε ύψος 0.575h και 0.375 αντίστοιχα) ενώ σταδιακά αποδυναμώνεται πάνω από το μέσο και κατάντη αυτής. Όσον αφορά στο εσωτερικό της κατασκευής κοντά στα ανοίγματα παρουσιάζει επίσης μέγιστες τιμές και για τις δυο περιπτώσεις ανοιγμάτων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία η ροή του αέρα μέσα και γύρω από ορθογώνια αγροτική κατασκευή με δυο διαφορετικές διατάξεις πλαϊνών ανοιγμάτων μελετήθηκαν με δυναμική αριθμητική προσομοίωση.

Από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν και την ανάλυση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων που προέκυψαν, παρατηρείται ότι σημαντικότερες αλλαγές λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της κατασκευής ενώ οι αλλαγές είναι πιο ήπιες στο εξωτερικό αυτής περιβάλλον.

Από την στατιστική επεξεργασία της κατανομής της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας προέκυψε ότι οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων εμφανίστηκαν κοντά στα ανοίγματα και πάνω από την οροφή της κατασκευής και για τις δυο διατάξεις πλαϊνών ανοιγμάτων. Παρατηρήθηκε διαφοροποίηση ως προς τη διαμόρφωση της ροής και τον σχηματισμό των στροβιλισμών, γεγονός που οφείλεται τόσο στη γεωμετρία της κατασκευής όσο και στην αποκόλληση και προσκόλληση της ροής.

Στο μέλλον τα αποτελέσματα μπορεί να επεκταθούν σε τρεις διαστάσεις, έτσι ώστε να προσαρμόζονται στην πραγματική γεωμετρία των αγροτικών κατασκευών και στην ανάλυση και άλλων παραμέτρων μικροκλίματος, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία και οι συγκεντρώσεις τοξικών αερίων εντός αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Περιοδικά
 Fragos VP, Psychoudaki SP, Malamataris, NA (2007). Direct simulation of two-dimensional turbulent flow over a surface-mounted obstacle. International Journal for Numerical Methods in Fluids 55: 985-1018.
 Fragos VP, Psychoudaki SP, Malamataris NA (2012). Two-dimensional numerical simulation of vortex shedding and flapping motion of turbulent flow around a rib. Computers & Fluids 69: 108-121.
 Norton, T., Grant, J., Fallon, R. & Sun, D-W. (2010). Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment" Computers and Electronics in Agriculture 73 (1) pp 17-36
 Norton, T., Grant, J., Fallon, R. & Sun, D-W. (2010). Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor

- environmental homogeneity, *Building and Environment* 45 (4): 983-995.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., Sun, D-W & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review, *Bioresource Technology* 98 (12): 2386–2414.
- Πρακτικά Συνεδρίων
- Nikita – Martzopoulou, Ch., 2007. New trends in animal housing in Greece: Greenhouse type livestock buildings. Workshop of CIGR Section II - Animal housing in hot climate. Cairo, Egypt, 1 – 4 of April, 2007.
- Paraskevopoulou I., Ntinis G., Fragos V. & Nikita-Martzopoulou Ch. Numerical approximation of airflow inside an agricultural structure model, 7th National Congress of Hellenic society of agricultural engineers, Athens November, 2011, Greece.

ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Ιωάννης Τρυπαναγνωστόπουλος, Παναγιώτης Ζαφειράκης, Βασιλική Μπρούνου
Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής, Πάτρα, Τ.Κ. 26500, e-mail: yiantrip@physics.upatras

Παρουσιάζονται διατάξεις εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνω σε θερμοκήπια, ως προέκταση ερευνητικών μελετών συνδυασμένης χρήσης φβ πλαισίων και ανακλαστήρων. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην χρήση διάχυτων ανακλαστήρων για την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε φβ πλαίσια. Οι διάχυτοι ανακλαστήρες ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία προς διάφορες κατευθύνσεις και επιτυγχάνουν έτσι μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της επιπλέον ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Στην περίπτωση των θερμοκηπίων με αλληλουχία μονάδων και επαναλαμβανόμενες δίριχτες οροφές, με εναλλάξ νότια και βόρεια, τον ρόλο του διάχυτου ανακλαστήρα έχουν οι βόρειες επιφάνειες της οροφής, λόγω της μεγάλης γωνίας ανάκλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις διαφανείς αυτές επιφάνειες. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία προς τα φβ που είναι εγκατεστημένα στις νότιες πλευρές, αυξάνει την προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια με συνέπεια την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Με την μέθοδο αυτή είναι δυνατή μια σχετική «ελάφρυνση» της νότιας οροφής του θερμοκηπίου από φβ πλαίσια και αύξηση του φωτισμού στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου προς όφελος της καλλιέργειας. Από τα πειράματα που έγιναν διαπιστώθηκε αύξηση της ισχύος των φβ ακόμη και 30%. Επίσης μελετήθηκαν και άλλοι τρόποι προσθήκης φβ στην οροφή των θερμοκηπίων, που να προκαλούν όσο το δυνατόν μικρή σκίαση στο εσωτερικό τους, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητά τους.

Λέξεις κλειδιά: θερμοκήπιο, φωτοβολταϊκά, ηλεκτρική απόδοση, διάχυτοι ανακλαστήρες

EFFECTIVE INSTALLATION OF PHOTOVOLTAICS ON THE ROOFS OF GREENHOUSES

Yiannis Tripanagnostopoulos, Panagiotis Zafeirakis, Vasiliki Brounou
University of Patras, Department of Physics, Patra 26500, Greece, e-mail: yiantrip@physics.upatras.gr

The effective installation of photovoltaics on the roofs of greenhouses is presented. The proposed system can be considered as an extension of studied systems that combine photovoltaics and reflectors and could be suitable to be applied at greenhouses. The investigated method for the considered application of photovoltaics on greenhouse roofs is to increase the solar input to PV modules by using diffuse reflectors. The diffuse reflectors can be effectively combined with photovoltaics as they achieve an almost homogenous distribution of solar radiation density on module surface. In the case of greenhouses which have a sequence of doubled sided roofs, one to south and the other to north, the role of the diffuse reflector has the transparent cover of the north side, as the angle of reflectance for the input solar radiation is large. In this way, the reflected solar radiation that is transmitted to the side that looks to south increases the absorbed solar radiation and therefore increases the electrical output. By this method, the PV installation can be "lighter" in the number of PV panels and it will result to an effective lighting of the interior greenhouse space with benefits to the planting. The laboratory experiments showed that the suggested method can increase electrical output by 30%. In addition, some other modes for the effective installation of photovoltaics on greenhouses were studied, in order to extract useful results.

Key words: greenhouse, photovoltaics, electrical efficiency, diffuse reflectors

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια είναι σύνθετα παραγωγικά συστήματα αγροτικών προϊόντων και απαιτούν βέλτιστη συνέργεια μεταξύ επιμέρους στοιχείων και διαδικασιών, όπου περιλαμβάνονται ο φωτισμός, η ενέργεια θέρμανσης και δροσισμού και ο αερισμός. Σχετικά με τον φωτισμό, υπάρχει αναγκαιότητα για κατάλληλο φωτισμό, όμως το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου και το υψηλό επίπεδο φωτισμού υπερθερμαίνει συχνά τα θερμοκήπια και προκαλεί ανωμαλίες στην ανάπτυξη των φυτών. Οι υψηλές θερμοκρασίες αποφεύγονται με τον εξαερισμό και την σκίαση, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες αντιμετωπίζονται συνήθως με τεχνητή θέρμανση. Η καύση βιομάζας, η χρήση διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης θερμότητας την ημέρα για υποβοήθηση των θερμικών αναγκών την νύχτα, οι

θερμοκουρτίνες οροφής και η γεωθερμία (όπου αυτή είναι διαθέσιμη) είναι εναλλακτικοί τρόποι για την εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών πηγών τον χειμώνα. Για την θερινή περίοδο, οι υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και αυξημένες θερμοκρασίες του αέρα αντιμετωπίζονται συνήθως με αποφυγή περίσσειας φωτισμού, περιορίζοντας τη διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος, με πλήρη αερισμό του θερμοκηπίου καθώς και με άλλους τρόπους δροσισμού.

Μεταξύ των υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων, το γυαλί είναι το σταθερότερο και με ικανοποιητικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες, παρά το μεγαλύτερο κόστος σχετικά με τα διαφανή πλαστικά καλύμματα. Μια εναλλακτική πρόταση για υλικό κάλυψης και έλεγχο του φωτισμού και των ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων είναι η χρήση των φακών Fresnel σε συνδυασμό με γραμμικούς θερμικούς, φβ ή φβ/θ

απορροφητές (Tripanagnostopoulos et al, 2007), η οποία εφαρμόστηκε αρχικά από τους Jirka et al το 1998. Επίσης, για την αντιμετώπιση των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών των θερμοκηπίων μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν προταθεί διάφοροι μέθοδοι περιλαμβανομένου και του συνδυασμού ηλιακής και αιολικής ενέργειας (Tripanagnostopoulos et al, 2004). Ακόμη, για παραγωγή κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες των θερμοκηπίων προτάθηκε η κατάλληλη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή τους (Rocamora and Tripanagnostopoulos, 2006). Στην κατεύθυνση αυτή παρουσιάστηκαν εμπορικά συστήματα με εγκατάσταση φβ στην οροφή θερμοκηπίων, όπου όμως η μεγάλη κάλυψη γίνεται συνήθως σε βάρος του φωτισμού του εσωτερικού χώρου. Στην παρούσα εργασία προτείνεται η εγκατάσταση φβ στην οροφή των θερμοκηπίων με μικρή σχετικά κάλυψη της επιφάνειάς τους, ώστε να υπάρχει αντίστοιχα και μικρή επιβάρυνση στη μείωση του φωτισμού.

2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

2.1. Ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραγόντων στα θερμοκήπια (ακτινοβολία, θερμοκρασία, υγρασία, κλπ), ανάλογα με τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, την εφαρμογή και τις τεχνικές λεπτομέρειες κατασκευής τους. Κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς έχει επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών χωριστά ή σε συνδυασμό, και μεταξύ αυτών η εισερχόμενη στο θερμοκήπιο ηλιακή ακτινοβολία είναι ο βασικός παράγοντας για την φωτοσύνθεση και την ανάπτυξή τους. Τα διαφανή καλύμματα παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποιότητα (φάσμα) της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες για τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας (Papadakis et al, 1998, Pollet and Pieters, 2000) και την επίδραση των διαφανών καλυμμάτων (Papadakis et al, 1998, Kittas et al, 1999), καθώς και για τους παράγοντες που επηρεάζουν την αρχιτεκτονική των θερμοκηπίων στις ευρωπαϊκές χώρες (Von Elsner et al, 2000).

Στις χώρες μικρού γεωγραφικού πλάτους, όπως είναι η Ελλάδα και άλλες Μεσογειακές χώρες, τη θερινή περίοδο αλλά και κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μεταξύ άνοιξης και φθινοπώρου, η ηλιακή ακτινοβολία καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών στα θερμοκήπια. Το χειμώνα, η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες των φυτών και ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά σε αυτό. Στην Ελλάδα, ακόμη και κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή και η θερμοκρασία αυξάνεται πολλές φορές πάνω από τα βιώσιμα όρια των φυτών. Ο φυσικός και τεχνητός εξαερισμός, η μείωση των θερμοκρασιών αέρα στο θερμοκήπιο με την εξάτμιση ύδατος και την σκίαση είναι απαραίτητες μέθοδοι για

τη μείωση της θερμοκρασίας. Για να αποφευχθεί η υψηλή ποσότητα φωτισμού το καλοκαίρι και σε άλλες περιόδους στη διάρκεια του έτους και για να κρατηθεί η θερμοκρασία των θερμοκηπίων σε ένα βιώσιμο όριο είναι απαραίτητος ο έλεγχος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν εφαρμοστεί διάφοροι μέθοδοι σκίασης για τη μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, απλοί και σύνθετοι, που χρειάζονται μηχανισμούς και κατανάλωση υψηλών ποσοτήτων ενέργειας. Οι πιο κοινές μέθοδοι μείωσης του φωτισμού στα θερμοκήπια είναι η χρήση ειδικών λευκών χρωμάτων και η χρήση κουρτινών, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με τον τεχνητό εξαερισμό και σύστημα ψύξης μέσω της εξάτμισης του νερού. Τα διαφανή καλύμματα καθορίζουν το εσωτερικό μικροκλίμα των θερμοκηπίων και το γυαλί θεωρείται κατάλληλο υλικό για διαφανή κάλυψη λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του σχετικά με τη μετάδοση ακτινοβολίας και τη σταθερότητα, σε σχέση με το πλαστικό. Όσον αφορά το κόστος, το γυαλί έχει σχεδόν το ίδιο κόστος με τα πλαστικά καλύμματα μετά από περίπου δέκα έτη λειτουργίας λόγω της αντικατάστασής τους 2-3 φορές.

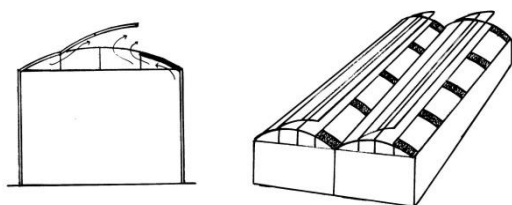
2.2. Εγκατάσταση φβ στην οροφή θερμοκηπίων

Από την έρευνα του Εργαστηρίου Ηλιακής Ενέργειας στο Παν/μιο Πατρών έχει προκύψει μέθοδος βελτίωσης της αποδιδόμενης ενέργειας από φβ εγκαταστάσεις σε οριζόντιες οροφές κτιρίων ή στο έδαφος (Tripanagnostopoulos et al 2002, Tripanagnostopoulos, 2007). Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα στις περιπτώσεις που εγκαθίστανται φβ πάνω στην οροφή των θερμοκηπίων. Κατ' αρχήν πρέπει να αναφερθεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει τελικά στα φυτά εντός του θερμοκηπίου είναι μειωμένη λόγω της παρεμβολής πολλών μεταλλικών κυρίως στοιχείων κάτω από την οροφή τους. Η μείωση αυτή μπορεί να φτάνει και το 20% και έτσι η προσθήκη φβ πλαισίων στην οροφή του θερμοκηπίου θα επιβαρύνει ακόμη περισσότερο τον επαρκή φωτισμό των φυτών.

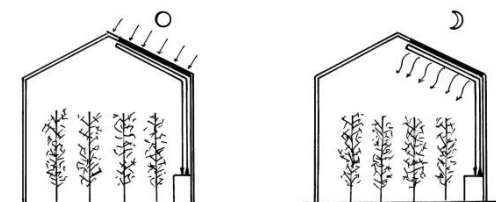
Για την αποδοτική εγκατάσταση φβ πλαισίων στην οροφή των θερμοκηπίων είναι απαραίτητο να περιοριστεί η σκίαση του εσωτερικού τους από τα μεταλλικά στοιχεία. Μια μείωση στο μισό θα δώσει τη δυνατότητα να γίνει εγκατάσταση φβ πλαισίων που να μην επιφέρουν πρόσθετη επιβάρυνση στον φωτισμό των φυτών, σε σύγκριση με το θερμοκήπιο που έχει την συνηθισμένη σκίαση από τα μεταλλικά στοιχεία. Έτσι απαιτείται μεταλλικός σκελετός από πιο λεπτές αλλά και πιο σκληρές ράβδους, λιγότερα πρόσθετα στοιχεία για κουρτίνες σκίασης, σωλήνες αερισμού, κλπ. Αν μειωθεί η σκίαση των μεταλλικών και άλλων στοιχείων στο 10% ή πιο κάτω, τότε μια κατάλληλου σχεδιασμού εγκατάσταση φβ με κάλυψη 10% της επιφάνειας του θερμοκηπίου είναι αποδεκτή και χωρίς δυσμενή επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών. Τα θερμοκήπια έχουν συνήθως κατά μήκος προσανατολισμό ανατολή-δύση ή βορράς-νότος, του άξονά τους. Στην περίπτωση των δίριχτων ή τοξοτών

θερμοκηπίων που έχουν προσανατολισμό ανατολή-δύση, η οροφή τους έχει την μία πλευρά στραμμένη προς νότο και την άλλη προς βορρά. Με την διάταξη αυτή είναι δυνατόν να αξιοποιείται ενεργειακά η προς νότο στραμμένη επιφάνεια με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ενώ η προς βορρά στραμμένη επιφάνεια της οροφής να λειτουργεί ως ανακλαστήρας της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε η κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων να είναι προς τα φβ πλαίσια της νότιας πλευράς της οροφής.

Η διάταξη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας για την αξιοποίηση των ανακλαστήρων στις ηλιακές διατάξεις θερμικών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται κατά πόσον η διάταξη ανακλαστήρας – φβ πλαίσια παρέχει αυξημένη προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φβ πλαίσια και κατά συνέπεια αν συμβάλει σε αυξημένη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από αυτά.



Εικόνα 1. Εγκατάσταση φβ στην οροφή θερμοκηπίου με κατάλληλη διάταξη για τον φωτισμό του.



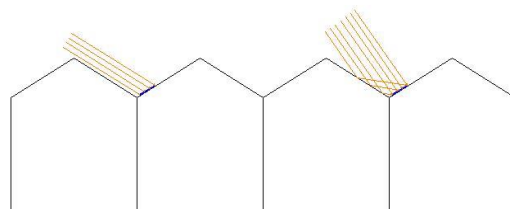
Εικόνα 2. Χρήση φβ/θ συλλεκτών και αποθήκευσης θερμότητας για ημερήσιο δροσισμό και νυχτερινή θέρμανση του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου.

Το θέμα που έχουν τα φωτοβολταϊκά σχετικά με την πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνειά τους είναι πως πρέπει να υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας για να μην υπάρξει πρόβλημα με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται. Στην περίπτωση που τόσο τα φβ πλαίσια όσο και οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι σταθερές, τότε οι ανακλαστήρες πρέπει να είναι διάχυτοι για να επιτυγχάνουν μια όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Αν όμως χρησιμοποιηθούν κατοπτρικοί ανακλαστήρες, τότε δημιουργούνται έντονες αντιθέσεις φωτισμού επί των φβ πλαισίων με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσής τους.

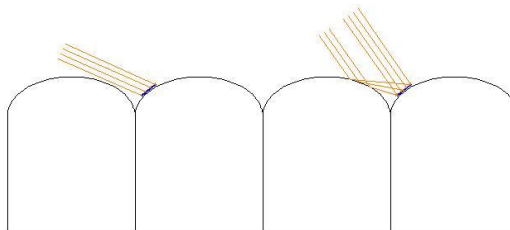
Στα θερμοκήπια που έχουν νότια φωτιζόμενη πλευρά της δίριχτης οροφής τους, τον ρόλο του διάχυτου ανακλαστήρα θα τον έχουν οι διαφανείς επιφάνειες της δίριχτης οροφής του θερμοκηπίου που έχουν βόρειο προσανατολισμό, λόγω της αυξημένης έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας από την μεγάλη γωνία ανάκλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτές τις επιφάνειες. Έτσι, στα θερμοκήπια που έχουν αλληλουχία μονάδων με δίριχτες ή τοξοτές οροφές, η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία συμβάλει στην αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φβ πλαίσια και αύξηση της ηλεκτρικής τους ενέργειας.

Με την κατάλληλη αξιοποίηση αυτής της διάταξης είναι δυνατή μια σχετική «ελάφρυνση» της νότιας οροφής του θερμοκηπίου από φβ πλαίσια, ενώ δεν θα υπάρχει και μεγάλη μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της πρόσθετης ηλιακής ενέργειας στα φβ πλαίσια από την ανακλώμενη δέσμη της βόρειας οροφής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται, σε έναν βαθμό, η μείωση του φωτισμού του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου, προς όφελος της καλλιέργειας.

Στην Εικ. 1 δείχνεται σχεδιαστικά η πρόταση για την εγκατάσταση φβ πλαισίων στην οροφή ενός θερμοκηπίου, όπου τα φβ δεν σκιάζουν συνεχώς την ίδια περιοχή μέσα στο θερμοκήπιο. Τα φβ αυτά πλαίσια μπορεί να φέρουν και θερμική μονάδα στην πίσω πλευρά τους (συλλέκτης φβ/θ) και σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, ώστε να μπορούν να λειτουργούν για τον δροσισμό του θερμοκηπίου την ημέρα, σαν συστήματα απολαβής της θερμότητας και μετά σαν συστήματα θέρμανσης του χώρου του θερμοκηπίου την νύχτα, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.



Εικόνα 3. Προτεινόμενη διάταξη για την αξιοποίηση της απέναντι πλευράς της οροφής του θερμοκηπίου ως ανακλαστήρα προς τα φβ πλαίσια.



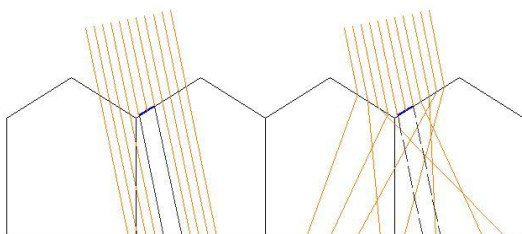
Εικόνα 4. Σχεδιαστική παρουσίαση της διάταξης που προτείνεται για εφαρμογή σε τοξοτά θερμοκήπια.

Μια σχεδιαστική παρουσίαση της διάταξης που προτείνεται να εφαρμοστεί στα δίριχτες και στα

τοξοτής οροφής θερμοκήπια, είναι στη Εικ.3 και στην Εικ. 4 αντίστοιχα. Στις εικόνες αυτές φαίνεται η τοποθέτηση που συνίσταται για τα φβ πλαίσια (στο προς τα κάτω μέρος της οροφής) για την βέλτιστη αξιοποίηση της απέναντι πλευράς της οροφής του θερμοκηπίου ως ανακλαστήρα και την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φβ πλαίσια.

Τα πειράματα που έγιναν σε εξομοιωτική διάταξη στο εργαστήριο και σε συνθήκες φυσικού ηλιασμού με φωτοβολταϊκά πλαίσια και διαφανή πλαστικές επιφάνειες σε επίπεδη και σε καμπυλωτή φόρμα, έδειξαν μια αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας από 10% έως 30% ανάλογα της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην διαφανή πλαστική επιφάνεια.

Η εξομοιωτική διάταξη ήταν μια εργαστηριακή ιδιοκατασκευή από διαφανές πλαστικό φύλλο, που αντιστοιχούσε στο σχήμα μιας (α) δίριχτης και (β) μιας τοξοτής οροφής θερμοκηπίου σε μικρότερο μέγεθος (1:5). Στην κατασκευή αυτή τοποθετείτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο που είχε μικρότερη επιφάνεια των κανονικών φβ πλαισίων (σε αναλογία περίπου 1:5) όπως θα ήταν σε πραγματικό θερμοκήπιο που δείχνεται στις Εικ. 3 και 4. Με την διάταξη αυτή έγιναν πειράματα με τον ήλιο στον χώρο δοκιμών του Εργαστηρίου, όπου καταγράφονταν οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στις επιφάνειες του πλαστικού φύλλου και φβ πλαισίου (χωρίς την ανακλώμενη και με την ανακλώμενη), οι θερμοκρασία στο φβ πλαίσιο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φβ πλαισίου (τάση και ένταση) για τον καθορισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Από τις μετρήσεις που έγιναν για την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φβ πλαίσια διαπιστώθηκε μια αντίστοιχη αύξηση σε σχέση με την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια των φβ πλαισίων αναφοράς, (χωρίς πρόσθετη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία).. Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατός κάποιος περιορισμός στον αριθμό των φβ πλαισίων στην οροφή του θερμοκηπίου για βελτίωση του φωτισμού του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου.

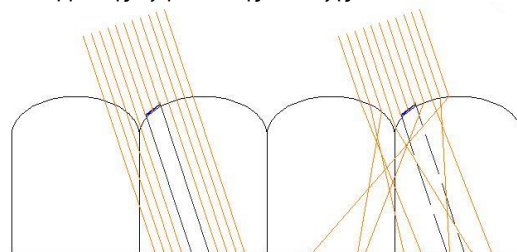


Εικόνα 5. Διάχυτο διαφανές κάλυμμα των δίριχτων θερμοκηπίων για εξομάλυνση της σκίασης από τα φβ πλαίσια.

Εκτός από την «ελάφρυνση» του αριθμού των φβ πλαισίων στην οροφή των θερμοκηπίων ένα ακόμη θέμα που είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψιν για τον σωστό φωτισμό εντός του θερμοκηπίου είναι η αποφυγή της έντονης σκιάς στον εσωτερικό χώρο

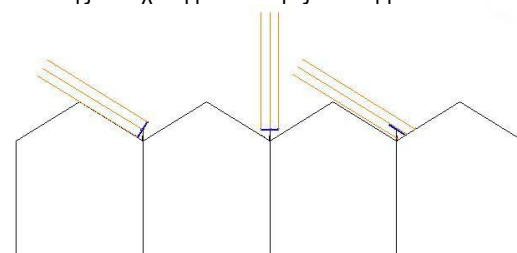
του από τα φβ πλαίσια. Για την αποφυγή της σκίασης αυτής το διαφανές κάλυμμα αντί να είναι «διαυγές» πρέπει να διαχέει το φως στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα των Εικ.5 και Εικ.6 για τα θερμοκήπια δίριχτης και τοξοτής οροφής αντίστοιχα.

Για να εκτιμηθεί το θέμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα εξομοιωτική διάταξη, όπου πάνω στο πλαστικό φύλλο τοποθετήθηκαν μικρού μεγέθους χαρτόνια, για να εξομοιώνουν τοποθέτηση φβ πλαισίων και έγιναν πειράματα (καταγραφή της προσπίπτουσας και της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το πλαστικό φύλλο), για να προσδιοριστεί η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό χώρο του «θερμοκηπίου». Για την μέτρηση της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε φβ αισθητήρας, με τον οποίο «σαρώθηκε» η επιφάνεια «εδάφους» στον χώρο που σχηματίζεται κάτω από το διαφανές πλαστικό κάλυμμα της εξομοιωτικής διάταξης.



Εικόνα 6. Διάχυτο διαφανές κάλυμμα των τοξοτών θερμοκηπίων για εξομάλυνση της σκίασης από τα φβ πλαίσια.

Από τις μετρήσεις που έγιναν αποδείχτηκε πως το διάχυτο κάλυμμα εξουδετερώνει σε μεγάλο βαθμό την έντονη σκίαση που προέρχεται από τα φβ πλαίσια προς συγκεκριμένη περιοχή, ανάλογα της θέσης του ήλιου, εντός του θερμοκηπίου. Έτσι, η ένταση στις περιοχές της σκίασης ήταν στο 50% της σκίασης σε σχέση με «διαυγές» κάλυμμα.

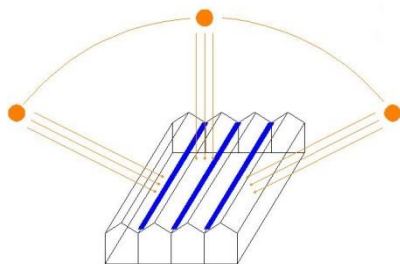


Εικόνα 7. Εγκατάσταση προσανατολιζόμενων στον ήλιο φβ πλαισίων για βέλτιστη ημερήσια λειτουργία και έλεγχο της σκίασης του εσωτερικού χώρου.

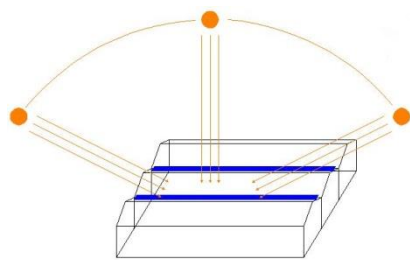
Μια άλλη πρόταση για εφαρμογή φβ πλαισίων στα θερμοκήπια είναι αυτή που δείχνεται στην Εικ.7. Η εγκατάσταση και αποδοτική λειτουργία αυτών των φωτοβολταϊκών διατάξεων γίνεται σε διαμήκεις βάσεις και δυνατότητα κινήσεων προσανατολισμού στον ήλιο. Με τον τρόπο αυτό τα φβ πλαίσια προσλαμβάνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας το

μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, η χρήση διάχυτου διαφανούς καλύμματος συμβάλει στην εξομάλυνση του φωτισμού-σκίασης του εσωτερικού χώρου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Στις Εικ. 8 και Εικ. 9 δείχνονται δύο τρόποι για την εγκατάσταση διατάξεων προσανατολισμού στον ήλιο, ανάλογα αν οι άξονες που τοποθετούνται τα φβ πλαίσια έχουν διεύθυνση βορράς-νότος ή ανατολή-δύση αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρειάζεται να μην σκιαστεί ο εσωτερικός χώρος από τα φβ πλαίσια, η διάταξη μπορεί να ρυθμίσει κατάλληλα την θέση τους ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και να αφήνει τις ηλιακές ακτίνες να «περνούν» πάνω και κάτω των φβ πλαισίων και να εισέρχονται στο θερμοκήπιο.



Εικόνα 8. Φωτισμός των φωτοβολταϊκών σε διάταξη βορράς-νότος των θερμοκηπιακών μονάδων



Εικόνα 9. Φωτισμός των φωτοβολταϊκών σε διάταξη ανατολή-δύση των θερμοκηπιακών μονάδων.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προτείνονται ορισμένες μέθοδοι για αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια φβ πλαισίων που τοποθετούνται στην οροφή των θερμοκηπίων. Με τις μεθόδους αυτές είναι δυνατή η αύξηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και 30%. Η εγκατάσταση φβ πλαισίων στην οροφή των θερμοκηπίων μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία στον εσωτερικό χώρο και γιαυτό η κάλυψη της οροφής πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Με την προτεινόμενη αξιοποίηση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με σχετική μείωση των μεταλλικών στοιχείων που βρίσκονται κάτω από την οροφή, εκτιμάται ότι επιτυγχάνεται ένας βέλτιστος τρόπος χρήσης φβ στα θερμοκήπια. Φυσικά, για να αποδειχτεί η πραγματική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών απαιτείται να γίνει πειραματική

καλλιέργεια σε πραγματικές συνθήκες σε κανονική θερμοκηπιακή εγκατάσταση.

Επίσης προτείνεται η χρήση διάχυτων διαφανών καλυμμάτων στις οροφές των θερμοκηπίων με τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά για εξομάλυνση του φωτισμού και της σκίασης εντός του χώρου του. Τα αποτελέσματα από την εξομοιωτική διάταξη έδειξαν πως η σκίαση από τα φβ πλαίσια στην οροφή των θερμοκηπίων με διάχυτο κάλυμμα δεν έχει έντονες αυξομειώσεις φωτισμού καθώς η διάχυση του φωτός «εξουδετερώνει» τις έντονες σκιές. Εναλλακτική διάταξη φβ στα θερμοκήπια μπορεί να είναι και το σύστημα προσανατολισμού των φβ πλαισίων στον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, για περισσότερη προσλαμβάνουσα ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα στατικά φβ πλαίσια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Jirka, V., Kuceravy, V., Maly, M., Pokorny, J., Rehor, E. 1998. The architectural use of glass raster lenses. In: Proceedings of the World. Renewable Energy Congress V, Part III, 1595–1598.
- Kittas C., Baille A., Giaglaras P. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. J. Agric. Eng. Res. 73: 341-351
- Papadakis G., Briassoulis, Mugnoz Scarascia G., Vox G., Feuilloy P., Stoffers J.A. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. J. Agric. Engng. Res. 77: 7-38
- Papadakis G., Manolakis D., Kyritsis S. 1998. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale model. J. Agric. Engng. Res. 71: 331-338
- Pollet I.V., Pieters J.G. 2000. Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials, part 3: Results for glass plates and plastic films. J. Agric. Engng. Res. 77: 419-429
- Rocamora M. C., Tripanagnostopoulos Y. 2006. Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses. Acta Horticulturae 719: 239-245.
- Tripanagnostopoulos Y. 2007. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. Solar Energy 81 (9): 1117-1131.
- Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M. 2005. Booster Reflector Contribution to Performance Improvement of Solar Collectors. Proc. in CD, Int. Conf. WREC 2005: 63–68, Aberdeen, Scotland, UK, 22–27 May 2005.
- Tripanagnostopoulos Y., Nousia, Th. Souliotis M. and Yianoulis P. 2002. Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems, Solar Energy 72, No 3, 217–234
- Tripanagnostopoulos Y., Siabekou Ch. and Tonui J. K. 2007. The Fresnel lens concept for solar control of buildings. Solar Energy 81 (5): 661-675.
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tonui J. K. and Kavga A. 2004. Greenhouse energy supply by solar/wind systems. In Proc (CD) Int. Conf Greensys2004, Leuven 12–16 Sep 2004.

Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D.,
Mistriotis A., Von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo
G., Suay-Cortes R. 2000. Review of structural and

functional characteristics of greenhouses in
European Union countries, part I: Designs
requirements. J. Agric. Eng. Res. 75: 1-16.

ΑΡΔΕΥΣΗ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ *IN SITU* ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΚΑΡΠΩΝ

Γεώργιος Ψαρράς¹, Κων/νος Χατζουλάκης¹, Ιωάννης Κασαπάκης¹, Wolfram Kloppmann²

¹ΕΛΓΟ Δήμητρα, Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων, Αγροκήπιο, 73100 Χανιά

²BRGM Service EAU, Orléans, France

Μελετήθηκαν οι επιδράσεις διαφορετικών τεχνικών άρδευσης και ενός συστήματος επεξεργασίας αστικών αποβλήτων στην παραγωγή, ποιότητα και ασφάλεια των παραγόμενων καρπών σε καλλιέργεια τομάτας. Εφαρμόστηκαν 9 χειρισμοί, συνδυάζοντας 3 τεχνικές άρδευσης (πλήρης, ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση και μερική διαβροχή του ριζικού συστήματος), 2 ποιότητες νερού (καλής ποιότητας και αστικά απόβλητα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας) και 2 βάθη εφαρμογής (0 και 15 εκατοστά). Τα αστικά απόβλητα χρησιμοποιήθηκαν μετά από μια επιπλέον επεξεργασία στον αγρό που περιελάμβανε: α) προσθήκη βαρέων μετάλλων (As, Cd, Cr, Cu, Pb), β) φίλτρο άμμου, γ) φίλτρο απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων, και δ) υπεριώδη ακτινοβολία. Μετρήθηκε το βάρος και ο αριθμός των παραγόμενων καρπών και έγιναν αναλύσεις σε δείγματα καρπών για ολικά στερεά και οξύτητα. Σε δείγματα νερού άρδευσης, αποβλήτων, εδάφους και καρπών προσδιορίστηκαν τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων και οι πληθυσμοί *E. coli*, ολικών κολοβακτηριδίων και ολικών βακτηρίων. Η παραγωγή καρπών ήταν ελαφρώς χαμηλότερη (5-7%) στους χειρισμούς ελλειμματικής άρδευσης, όμως η αποτελεσματικότητα στη χρήση του νερού άρδευσης αυξήθηκε κατά 20%. Δεν ανιχνεύθηκαν πληθυσμοί *E. coli* σε κανένα δείγμα αποβλήτων μετά την επεξεργασία, όπως και σε κανένα δείγμα καρπών που αρδεύονταν με τα επεξεργασμένα αστικά απόβλητα. Ο αριθμός των δειγμάτων εδάφους όπου ανιχνεύθηκαν *E. coli* ήταν παρόμοιος τόσο στον μάρτυρα όσο και στον χειρισμό άρδευσης με απόβλητα, ένδειξη που υποδηλώνει ότι η παρουσία των βακτηρίων οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες. Ο συνδυασμός φίλτρου άμμου και φίλτρου απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων υπήρξε αποτελεσματικός στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων, και δεν παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις μεταξύ των χειρισμών στα επίπεδα βαρέων μετάλλων στο έδαφος και τους καρπούς.

Λέξεις κλειδιά: τομάτα, άρδευση, αστικά απόβλητα, βαρέα μέταλλα, *E. coli*, ποιότητα καρπών

IRRIGATION OF TOMATO WITH TREATED WASTEWATER: EVALUATION OF *IN SITU* TREATMENT SYSTEM AND EFFECTS OF DIFFERENT IRRIGATION TECHNIQUES ON YIELD, QUALITY AND SAFETY OF TOMATO FRUIT

Georgios Psarras¹, Konstantinos Chartzoulakis¹, Ioannis Kasapakis¹, Wolfram Kloppmann²

¹NAGREF, Institute for Olive Tree and Subtropical Plants of Chania, Agrokipio, 73 100, Chania, Greece

²BRGM Service EAU, Orléans, France

gpsarras@nagref-cha.gr, kchartz@nagref-cha.gr

The effects of different irrigation techniques and water qualities on tomato yield, fruit quality and health risks were investigated under field conditions in Crete. Nine irrigation treatments were applied, combining 3 water quantities: full irrigation (FI), regulated deficit irrigation (RDI) and partial root drying (PRD), 2 water qualities: fresh water (FW) and secondary treated municipal wastewater (WW), and 2 depths of application: 0 (S) and 15 cm (SS). Secondary-treated wastewater was used after an on site treatment including: a) heavy metal (As, Cd, Cr, Cu, Pb) addition, b) sand filter, c) heavy metal removal (HMR), and d) UV treatment. The fruit yield was measured, while fruit samples were analyzed for total soluble solids and titratable acidity. Samples of irrigation water, soil and fruit were analyzed for heavy metals, *E. coli*, total coliform and total bacterial populations. Commercial fruit yield under deficit irrigation remained 5-7% lower compared to the fully-irrigated treatment, mostly due to an increase of the non-commercial fruit, while water use efficiency for harvested yield was increased by 20%. The UV treatment was efficient in removing *E. coli* from the WW, with no sample detected as *E. coli*-positive. No *E. coli* populations were detected on harvested fruit, while the number of *E. coli*-positive soil samples was similar in both FW and WW treatments, indicating soil contamination by exogenous factors. The combination of sand filter and HMR unit was efficient in removing heavy metals, resulting in no differentiation of soil and fruit heavy metal content between FW and WW treatments.

Key words: tomato, irrigation, wastewater, heavy metals, *E. coli*, fruit quality

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή φρούτων και λαχανικών βασίζεται πλέον στην άρδευση, ακόμη και για καλλιέργειες ανθεκτικές στην έλλειψη νερού, με στόχο την μεγιστοποίηση της παραγωγής. Το 70% περίπου της χρήσης νερού καλής ποιότητας, σε παγκόσμιο

επίπεδο, καταναλώνεται στη γεωργία (FAO, 2007), ενώ στην Κρήτη, το ποσοστό φτάνει στο 85% (Περιφέρεια Κρήτης, 2002). Η διαθεσιμότητα νερού καλής ποιότητας είναι περιορισμένη και η κατάσταση αναμένεται να επιδεινωθεί ακόμη περισσότερο στο μέλλον, λόγω της έντασης του

ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών και της προβλεπόμενης κλιματικής αλλαγής (Chartzoulakis and Psarras, 2005). Σύμφωνα με υπολογισμούς, η χρήση σύγχρονων συστημάτων και τεχνικών άρδευσης και η επαναχρησιμοποίηση νερών υποβαθμισμένης ποιότητας μπορούν να μειώσουν τη χρήση του νερού καλής ποιότητας μέχρι και 30%, σε επίπεδο αγρού (Dworak et al., 2007).

Η προσαρμογή στις απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271 της ΕΕ σχετικά με την επεξεργασία αστικών αποβλήτων σε μικρές Κοινότητες, αναμένεται να αυξήσει τη διαθεσιμότητα αστικών αποβλήτων σε αγροτικές περιοχές στο μέλλον (Maton et al., 2010). Στα πλαίσια αυτά, δρομολογήθηκαν οι εργασίες του Ευρωπαϊκού Προγράμματος «SAFIR», με στόχο την παραγωγή σύγχρονων και πλήρως ελεγχόμενων συστημάτων επεξεργασίας αστικών αποβλήτων και άρδευσης των καλλιεργειών, τα οποία θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε επίπεδο μεμονωμένου αγρού ή μικρής Κοινότητας, με στόχο την παραγωγή ασφαλών προϊόντων με μειωμένη κατανάλωση νερού καλής ποιότητας (Jensen et al., 2010; Plauborg et al., 2010).

Οι στόχοι της παρούσας εργασίας, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του συγκεκριμένου Προγράμματος, ήταν: α) η αξιολόγηση ενός συστήματος *in situ* επεξεργασίας αστικών αποβλήτων (ποιότητας αντίστοιχης της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, αλλά βεβαρυμένων με βαρέα μέταλλα), β) η αξιολόγηση τεχνικών ελλειμματικής άρδευσης με στόχο τη μειωμένη χρήση νερού στην άρδευση της τομάτας, γ) η διατήρηση της παραγωγής και ποιότητας των καρπών σε υψηλά επίπεδα, δ) η ελαχιστοποίηση των κινδύνων για την υγεία των παραγωγών και καταναλωτών. Οι πειραματικές εργασίες διήρκεσαν 3 καλλιεργητικές περιόδους, ενώ στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 3ου έτους πειραματισμού, όπου είχε ολοκληρωθεί η εξέλιξη και βελτιστοποίηση των εφαρμοζόμενων χειρισμών.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

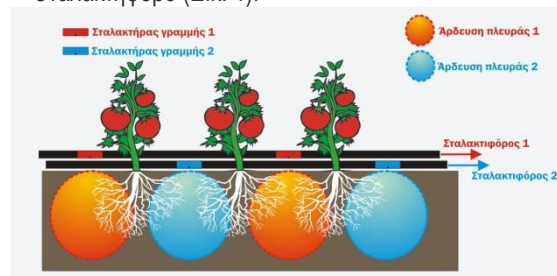
2.1. Φυτικό υλικό και συνθήκες καλλιέργειας

Φυτά τομάτας (υβρίδιο 'Verdoun') φυτεύθηκαν σε αποστάσεις 0,5 x 1m, με συνολικό κύκλο καλλιέργειας 123 ημερών (τέλη Απριλίου έως μέσα Αυγούστου 2008). Η συνολική βροχόπτωση κατά την καλλιεργητική περίοδο ήταν 31 mm, συγκεντρωμένη στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας, με αποτέλεσμα την ύπαρξη περιόδου 75 ημερών, όπου οι ανάγκες των φυτών σε νερό καλύπτονταν αποκλειστικά μέσω της άρδευσης.

2.2. Χειρισμοί

Συνολικά εφαρμόστηκαν 9 χειρισμοί, συνδυάζοντας: α) 3 τεχνικές άρδευσης: πλήρης άρδευση (FI), ελεγχόμενη ελλειμματική άρδευση (RDI) και μερική διαβροχή του ριζικού συστήματος (PRD), β) 2 ποιότητες νερού: νερό από το τοπικό δίκτυο άρδευσης (FW) και αστικά απόβλητα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (WW), και γ) 2 βάθη εφαρμογής: επιφανειακή άρδευση (S) και υπόγεια άρδευση στα 15 cm βάθους (SS). Το RDI

εφαρμόστηκε μόνο με νερό καλής ποιότητας και επιφανειακή άρδευση, ως μέτρο σύγκρισης της αποτελεσματικότητας του PRD σε σχέση με την κλασική ελλειμματική άρδευση. Η εφαρμογή των FI και RDI έγινε με μονές γραμμές άρδευσης και ενσωματωμένους σταλακτήρες (NETAFIM, Ισραήλ) με παροχή 1,6 l/hr, και ισαποχή 0,5 m (1 σταλακτήρας ανά φυτό). Η εφαρμογή του PRD έγινε μέσω ειδικά κατασκευασμένης διπλής γραμμής άρδευσης από την εταιρεία NETAFIM, η οποία έφερε ίδιου τύπου σταλακτήρες, με ισαποχή 1 m σε κάθε σταλακτηφόρο (Εικ. 1).



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου εφαρμογής της μερικής διαβροχής του ριζικού συστήματος, με χρήση διπλής γραμμής άρδευσης.

Οι χειρισμοί ελλειμματικής άρδευσης (RDI και PRD), ξεκίνησαν στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξης του πρώτου καρπού στην πρώτη ταξιανθία και εφαρμόστηκαν σε 3 στάδια: 1) αρχική μείωση στο 85% της υπολογιζόμενης εξατμισοδιαπνοής (ETc) για 15 ημέρες, 2) Κύρια περίοδος εφαρμογής στο 65% ETc, και 3) Μείωση στο 50% ETc, για τις τελευταίες 15 ημέρες της καλλιέργειας. Η συνολική εξοικονόμηση νερού έφτασε το 23%, σε σχέση με την πλήρη άρδευση. Ο υπολογισμός των αναγκών για το FI (100% ETc), έγινε με χρήση συντελεστών καλλιέργειας (kc) που κυμαίνονταν από 0,45-1,10 σύμφωνα με τους Tsanis et al. (1996), ενώ υπήρχε παράλληλη προσαρμογή με βάση μετρήσεις εδαφικής υγρασίας (% v/v) σε βάθη 10-40 cm, με χρήση αισθητήρων PR-2 (Delta-T, M. Βρετανία). Η προσαρμογή (αύξηση ή μείωση της ποσότητας άρδευσης) γινόταν με βάση την απόκλιση που παρουσίαζε το ποσοστό υγρασίας του εδάφους, σε σχέση με την υδατοϊκανότητά του, μετά από την άρδευση.

2.3. Επεξεργασία αποβλήτων *in situ*

Απόβλητα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας από τις εγκαταστάσεις της ΔΕΥΑ Χανίων χρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση των φυτών. Τα απόβλητα δέχονταν μια επιπλέον επεξεργασία στον αγρό, πριν την εφαρμογή τους. Εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στα τοπικά διαθέσιμα απόβλητα, διαμορφώθηκε ένα σύστημα έγχυσης βαρέων μετάλλων σε αυτά, με σκοπό τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του συστήματος επεξεργασίας σε περιπτώσεις αποβλήτων που ήταν βεβαρυμένα με βαρέα μέταλλα. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε δεξαμενή που περιείχε πυκνό διάλυμα βαρέων μετάλλων υπό συνεχή ανάδευση, από το οποίο γινόταν τροφοδότηση του νερού άρδευσης με συγκεντρώσεις 20 µg/l As, 5 µg/l Cd, 100 µg/l Cr, 200

μg/l Cu και 100 μg/l Pb, μέσω μηχανικής δοσομετρικής αντλίας. Ακολούθως, υπήρχε σύστημα επεξεργασίας που αποτελούνταν από ένα φίλτρο άμμου, μια μονάδα απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων (Battilani et al., 2010) και μια μονάδα υπεριώδους ακτινοβολίας (40 W - δόση UV 400 J.m⁻²) για μείωση του πληθυσμού των παθογόνων βακτηρίων.

2.4. Μετρήσεις - Αναλύσεις

Συνολικά (integrated) και στιγμιαία δείγματα νερού ελήφθησαν 3 φορές κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για κάθε στάδιο επεξεργασίας των αποβλήτων, όπως και για το νερό καλής ποιότητας (FW). Στα δείγματα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για ανόργανα στοιχεία, περιλαμβανομένων και των βαρέων μετάλλων, με χρήση κυρίως συσκευών ICP (AES και MS) και ακολουθώντας διεθνή και εσωτερικά πρωτόκολλα αναλύσεων του διαπιστευμένου εργαστηρίου του BRGM Service Eau στη Γαλλία. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν 10 δειγματοληψίες νερού για εκτίμηση πληθυσμού ολικών κολοβακτηριδίων, *E. coli* και συνολικού αριθμού βακτηρίων (Forslund et al., 2012). Αντίστοιχες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα εδάφους και καρπών, με τελευταία δειγματοληψία στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Οι αναλύσεις βαρέων μετάλλων στους καρπούς πραγματοποιήθηκαν σε διαπιστευμένο εργαστήριο του SSICA (Stazione Sperimentale Industria Conserve Alimentari) στην Parma της Ιταλίας. Κατά τη διάρκεια της συγκομιδής μετρήθηκαν ο αριθμός και το βάρος των εμπορεύσιμων και μη εμπορεύσιμων καρπών, ενώ πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για ολικά στερεά (TSS) και οξύτητα (TA).

2.5. Πειραματικός σχεδιασμός - στατιστική επεξεργασία

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις (plots) για κάθε χειρισμό, σε τυχαιοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων (completely randomized block design). Η κατανομή των plots στον πειραματικό αγρό εμφανίζεται στην Εικόνα 2. Κάθε επανάληψη περιελάμβανε 100 φυτά σε 5 γραμμές (50 m² έκταση κάθε plot), από τις οποίες οι δύο ακραίες δεν χρησιμοποιήθηκαν για δειγματοληψίες και μετρήσεις. Η στατιστική ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας ένα general linear model για αρχική εκτίμηση της σημαντικότητας της επίδρασης κάθε χειρισμού και το LSD-τεστ για τη διαφοροποίηση των μέσων όρων, μέσω του λογισμικού SPSS 16.0 (SPSS Inc., ΗΠΑ).

Επανάληψη 1			Επανάληψη 2			Επανάληψη 3		
1	WW	S FI	10	FW	S RDI	19	WW	SS FI
2	FW	SS FI	11	WW	S FI	20	WW	S PRD
3	FW	SS PRD	12	WW	SS PRD	21	WW	SS PRD
4	WW	S PRD	13	FW	SS FI	22	WW	S FI
5	FW	S PRD	14	FW	S FI	23	FW	S RDI
6	WW	SS FI	15	WW	S PRD	24	FW	SS PRD
7	FW	S RDI	16	FW	SS PRD	25	FW	S FI
8	FW	S FI	17	WW	SS FI	26	FW	S PRD
9	WW	SS PRD	18	FW	S PRD	27	FW	SS FI

Εικόνα 2. Κατανομή των 27 plots στον πειραματικό αγρό.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Παραγωγή και ποιότητα καρπών

Η παραγωγή εμπορεύσιμων καρπών δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών άρδευσης, αν και ήταν 5-7% χαμηλότερη σε απόλυτες τιμές στους χειρισμούς ελλειμματικής άρδευσης, κυρίως λόγω της αύξησης των μη εμπορεύσιμων καρπών μικρού μεγέθους (Πίνακας 1). Η ποιότητα του νερού άρδευσης δεν επηρέασε το ύψος της παραγωγής.

Πίνακας 1. Επίδραση των τεχνικών άρδευσης στη παραγωγή εμπορεύσιμων και μη εμπορεύσιμων καρπών και στην αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού

Τεχνική άρδευσης	Εμπορεύσιμη Παραγωγή	Μη εμπορεύσιμη παραγωγή	Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού
		tn/στρ.	
Πλήρης	7,56 a*	0,84 b	13,4 b
PRD	7,25 a	0,99 a	16,7 a
RDI	7,10 a	1,06 a	16,3 a

*Μέσοι όροι από 3 επαναλήψεις. Διαχωρισμός μέσων όρων με LSD-τεστ ($P < 0,05$).

Το κυριότερο πλεονέκτημα της ελλειμματικής άρδευσης είναι η αυξημένη αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού, η οποία σε περιοχές με μειωμένη διαθεσιμότητα νερού καλής ποιότητας μπορεί να είναι πιο σημαντική από μια μικρή μείωση της αναμενόμενης παραγωγής. Η εξοικονόμηση νερού στους χειρισμούς ελλειμματικής άρδευσης έφτασε το 23%, ενώ και η αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού για την παραγωγή εμπορεύσιμων καρπών ήταν μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με την πλήρη άρδευση (Πίνακας 1). Οι χειρισμοί PRD και RDI δεν παρουσίασαν διαφοροποιήσεις ως προς το ύψος της εμπορεύσιμης παραγωγής, γεγονός που είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Savic et al. (2009). Παρόλα αυτά, υπάρχουν αναφορές όπου η χρήση του PRD υπήρξε πιο αποτελεσματική στην παραγωγή καρπών τομάτας, σε σχέση με την εφαρμογή RDI (Ismail et al., 2009; Kirda et al., 2007). Η διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ των ερευνητικών αποτελεσμάτων στο συγκεκριμένο θέμα, μπορεί να εξηγηθεί από πρόσφατα αποτελέσματα (Wang et al., 2012), όπου η αποτελεσματικότητα του PRD εξαρτάται από το πόσο χαμηλά θα φτάσει η εδαφική υγρασία στην πλευρά του ριζικού συστήματος που δεν αρδεύεται. Αν και αυτό μπορεί εύκολα να ελεγχθεί σε συνθήκες πειραματισμού, πρακτικά είναι κάτι που δεν μπορεί να ελέγξει ο μέσος παραγωγός.

Τα ερευνητικά αποτελέσματα στη διεθνή βιβλιογραφία διίστανται επίσης ως προς το ύψος της παραγωγής που μπορεί να επιτευχθεί σε συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης σε σχέση με την πλήρη άρδευση. Οι Savic et al. (2009) αναφέρουν μείωση της παραγωγής περίπου στο 80% του FI, τόσο από το PRD, όσο και από το RDI, ενώ αντίθετα οι Campos et al. (2009) δεν παρατήρησαν σημαντικές διαφορές μεταξύ PRD και FI σε συνθήκες

θερμοκηπίου. Ο γενότυπος έχει αναφερθεί ως πηγή διαφοροποίησης της αντίδρασης στην ελλειμματική άρδευση (Savic et al., 2011), ενώ οι Patane et al. (2011) αναφέρουν ότι ο βαθμός μείωσης της παραγωγής σε συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης του φυτού στο οποίο αυτή θα ξεκινήσει. Στην παρούσα εργασία, η εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης ξεκίνησε σε μια περίοδο όπου η καρπώδεια και η φάση της έντονης κυτταροδιαίρεσης είχε ολοκληρωθεί για σημαντικό αριθμό καρπών του φυτού. Παράλληλα, η σταδιακή εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης σε 3 φάσεις φαίνεται να είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας, αφού σε προηγούμενες καλλιεργητικές περιόδους στον ίδιο πειραματικό αγρό, η εφαρμογή σταθερά χαμηλών επιπέδων ελλειμματικής άρδευσης καθόλη την περίοδο δεν ήταν εξίσου αποδοτική (Ψαράς κ.α., αδημοσίευτα δεδομένα).

Η εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης έχει αναφερθεί ότι αυξάνει τα ολικά στερεά του καρπού της τομάτας (Patane et al., 2011). Όμως, αυτό δεν ισχύει για όλους τους γενότυπους (Savic et al., 2011), ενώ σε περιπτώσεις όπου το PRD δεν είχε αρνητική επίδραση στο ύψος της παραγωγής, οι επιδράσεις στα ολικά στερεά και στην οξύτητα ήταν από πολύ μικρές ως μη σημαντικές (Campos et al., 2009). Στην παρούσα εργασία, τα ολικά στερεά και η οξύτητα δεν επηρεάστηκαν από την ποιότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε, την τεχνική άρδευσης και το βάθος άρδευσης (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Επίδραση των διάφορων χειρισμών σε ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού κατά την περίοδο της μέγιστης παραγωγής.

Χειρισμός άρδευσης	Ολικά στερεά (° Brix)	Οξύτητα (g κιτρικού/100g)
Ποσότητα (NS*)		
Πλήρης	4,57	0,368
PRD	4,61	0,353
RDI	4,50	0,358
Ποιότητα (NS)		
FW	4,57	0,353
WW	4,60	0,358
Βάθος (NS)		
Επιφανειακή	4,56	0,367
Υπόγεια	4,60	0,342

*NS: Μη στατιστικώς σημαντική διαφοροποίηση των χειρισμών (General Linear Model Analysis, $P < 0,05$)

3.2. Επεξεργασία αποβλήτων

Το σύστημα *in situ* επεξεργασίας των αποβλήτων ήταν αρκετά αποτελεσματικό στο να μειώσει τα επίπεδα των 5 βαρέων μετάλλων που είχαν προστεθεί, σε ποσοστά που κυμαίνονταν από 70-90%. Παρόμοια ποσοστά επιτεύχθηκαν από το σύστημα και σε πειραματικούς σε άλλες χώρες, στα πλαίσια του προγράμματος SAFIR (Battilani et al., 2010). Σε κάθε περίπτωση, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων μετά την επεξεργασία είχαν μειωθεί σε επίπεδα μικρότερα από τα επιτρεπόμενα για επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων για άρδευση, με βάση την τρέχουσα Ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ 145116, ΦΕΚ 354/8-3-2011). Ως αποτέλεσμα,

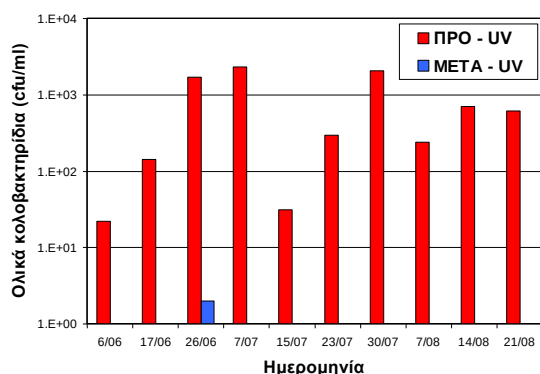
δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος μεταξύ του μάρτυρα και του χειρισμού άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα (Πίνακας 3), έπειτα από 2 περιόδους λειτουργίας του συστήματος επεξεργασίας. Αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση και στη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στους καρπούς (Sande et al., αδημοσίευτα δεδομένα).

Πίνακας 3. Επίδραση της ποιότητας του νερού άρδευσης στη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος..

Στοιχείο	Μάρτυρας (FW)	Απόβλητα (WW)
As (mg/kg)	12,8 a*	15,8 a
Cd (mg/kg)	0,23 a	0,27 a
Cr (mg/kg)	51,0 a	61,3 a
Cu (mg/kg)	21,5 a	27,3 a
Pb (mg/kg)	35,0 a	35,5 a

*Μέσοι όροι στην ίδια γραμμή ακολουθούμενοι από το ίδιο γράμμα, δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά (LSD-τεστ, $P < 0,05$)

Η χρήση της λάμπας υπεριώδους ήταν εξίσου αποτελεσματική στη μείωση των παθογόνων βακτηρίων στα απόβλητα, αφού μόλις σε 1 από τα δέκα δείγματα που ελήφθησαν στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανιχνεύθηκε πληθυσμός κολοβακτηριδίων (Διάγραμμα 1), ενώ σε κανένα δείγμα δεν ανιχνεύθηκαν πληθυσμοί *E. coli*. Επομένως, τα επεξεργασμένα απόβλητα πληρούσαν τα σχετικά όρια της τρέχουσας Ελληνικής νομοθεσίας για απεριόριστη χρήση για άρδευση των καλλιεργειών. Όσον αφορά στα δείγματα καρπών τομάτας, σε κανένα από αυτά δεν ανιχνεύθηκαν πληθυσμοί *E. coli*. Παρόλα αυτά, βρέθηκαν 3 θετικά δείγματα *E. coli* σε έδαφος που αρδευόταν με απόβλητα και 3 σε έδαφος που αρδευόταν με νερό καλής ποιότητας. Η απουσία *E. coli* στα απόβλητα που χρησιμοποιούνταν για άρδευση και το γεγονός ότι δεν υπήρξε διαφοροποίηση στις αναλύσεις εδάφους μεταξύ των χειρισμών FW και WW, καταδεικνύει ότι η ανίχνευση *E. coli* στο έδαφος οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες και πιθανότατα στην πανίδα του πειραματικού αγρού. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από επιπλέον αναλύσεις με την τεχνική Pulse Field Gel Electrophoresis που πραγματοποιήθηκαν σε απομονώσεις *E. coli* από τα δείγματα αποβλήτων και εδάφους, όπου δεν βρέθηκε γονιδιακή συσχέτιση μεταξύ των δύο πληθυσμών (Forslund et al., 2012).



Διάγραμμα 1. Επίπεδα πληθυσμών ολικών κολοβακτηριδίων σε δείγματα αποβλήτων πριν και μετά την χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) στον αγρό.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης στην υπαίθρια τομάτα, τόσο ως PRD όσο και ως RDI, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού άρδευσης, δίχως αρνητικές συνέπειες στο ύψος της παραγωγής ή την ποιότητα των καρπών. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή του PRD έχει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας στην εφαρμογή από τον μέσο παραγωγό, δίχως να προσφέρει κάποιο ουσιαστικό πλεονέκτημα.

Η χρήση επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για άρδευση λαχανικών μπορεί να μειώσει σημαντικά τη χρήση νερού καλής ποιότητας, σε περιοχές όπου η διαθεσιμότητά του είναι περιορισμένη. Το χαμηλό κόστος σύστημα *in situ* επεξεργασίας αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει λύση σε περιπτώσεις όπου η ποιότητα των διαθέσιμων επεξεργασμένων αποβλήτων είναι οριακά πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια για απεριόριστη άρδευση των καλλιεργειών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος SAFIR (FP6: FOOD-CT-2005-023168). Οι συγγραφείς ευχαριστούν τους Γεώργιο Κατζουράκη, Νεκταρία Διγαλάκη και Αθηνά Γιαννακάκη για τη βοήθειά τους στις εργασίες στον αγρό και το εργαστήριο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Battilani, A., Steiner, M., Andersen, M., Back, S.N., Lorenzen, J., Schweitzer, A., Dalsgaard, A., Forslund, A., Gola, S., Klopman, W., Plauborg, F. and Andersen, M.N. 2010. Decentralised water and wastewater treatment technologies to produce functional water for irrigation. *Agric. Water Manage.* 98:385-402.

Campos, H., Trejo, C., Peña-Valdiva, C.B., Ramirez-Ayala, C. and Sanchez-Garcia, P. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Sci. Hort.* 120: 493-499.

Chartzoulakis, K. and Psarras, G. 2005. Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106:147-157.

Dworak, T., Berglund, M., Laaser, C., Strosser, P., Roussard, J., Grandmougin, B., Kossida, M., Kyriazopoulou, I., Berbel, J., Kolberg, S., Rodriguez-Diaz, J.A. and Montesinos, P., 2007. EU water saving potential (Part 1-Report), ENV.D.2/ETU/2007/001r.

FAO. 2007. FAOSTAT data, FAO statistical databases FAOSTAT., www.fao.org.

Forslund, A., Ensink, J.H.J., Markussen, B., Battilani, A., Psarras, G., Gola, S., Sandei, L., Fletcher, T. and Dalsgaard, A. 2012. *Escherichia coli* contamination and health aspects of soil and tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) subsurface drip irrigated with on-site treated domestic wastewater. *Water Res.* 46: 5917-5934.

Ismail, M.R. and Phizackerley S. 2009. Effects of partial rootzone and controlled deficit irrigation on growth, yield and peroxidase activity of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*, Mill.). *Intern. J. Agric. Res.* 4:46-52.

Jensen, C.R., Battilani, A., Plauborg, F., Psarras, G., Chartzoulakis, K., Janowiak, F., Stikic, R., Jovanovic, Z., Li, G., Qi, X., Liu, F., Jacobsen, S.E. and Andersen, M.N. 2010. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signalling in potatoes and tomatoes. *Agric. Water Manage.* 98:403-413.

Kirda, C., Topcu, S., Cetin, M., Dasgan, H.Y., Kaman, H., Topaloglu, F., Derici, M.R. and Ekici, B. 2007. Prospects of partial root zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region. *Ann. Appl. Biol.* 150:281-291.

Maton, L., Psarras, G., Kasapakis, G., Lorenzen, J.R., Andersen, M., Boesend, M., Bak, S.N., Chartzoulakis, K., Pedersen, S.M. and Kloppmann, W. 2010. Assessing the net benefits of using wastewater treated with a membrane bioreactor for irrigating vegetables in Crete. *Agric. Water Manage.* 98:458-464.

Patane, C., Tringali S. and Sortino, O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Sci. Hort.* 129:590-596.

Plauborg, F., Andersen, M.N., Liu, F., Ensink, J. and Ragab R. 2010. Safe and high quality food production using low quality waters and improved irrigation systems and management: SAFIR. *Agric. Water Manage.* 98:377-384.

Περιφέρεια Κρήτης. 2002. Ορθολογική Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Κρήτης. Ενημερωτικό Φυλλάδιο, pp.24.

Savic, S., Liu, F., Stikic, R., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. and Jovanovic Z. 2009. Comparative effects of partial rootzone drying and deficit irrigation on growth and physiology of tomato plants. *Arch. Biol. Sci.* 61:801-810.

- Savic, S., Stikic, R., Zaric, V., Vucelic-Radovic, B., Jovanovic, Z., Marjanovic, M., Djordjevic, S. and Petkovic, D. 2011. Deficit irrigation technique for reducing water use of tomato under polytunnel conditions. *J. Central Europ. Agric.* 12:597-607.
- Tsanis, I.K., Londra, P.A. and Angelakis, A.N., 1996. Assessment of water needs for irrigation in Greece. Final Report of EU-APAS RENA-CT 94-0038 project.
- Wang, Y., Liu, F. and Jensen, C.R. 2012. Comparative effects of deficit irrigation and alternate partial root-zone irrigation on xylem pH, ABA and ionic concentrations in tomatoes. *J. Exp. Bot.* 63:1907-1917.

ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ Ca ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΠΙΠΕΡΙΑΣ

Ανδρέας Ροπόκης^{1,2}, Νικόλαος Κατσούλας², Κωνσταντίνος Κίττας², Αναστάσιος Κότσιρας³,
Κωνσταντίνη Λαγού¹, Δημήτριος Σάββας¹

¹Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

²Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38446, Βόλος

³Τμήμα Φυτικής Παραγωγής της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας, ΤΕΙ Καλαμάτας, Αντικάλamos Μεσσηνίας,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πειραματική εργασία, εφαρμόσθηκαν 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca^{2+} στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (1.5, 3.0, 4.5 και 6.0 mM), με σκοπό την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου ικανού να προβλέπει τη συσσώρευση του Ca^{2+} στο περιβάλλον των ριζών, ως συνάρτηση της συγκέντρωσής του στο διάλυμα συμπλήρωσης. Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων απορρόφησης του Ca^{2+} πραγματοποιήθηκε σε εννέα διαδοχικά χρονικά διαστήματα μέσω μέτρησης της απομάκρυνσης νερού και θρεπτικών στοιχείων από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χαμηλότερη συγκέντρωση Ca^{2+} στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης, η οποία οδήγησε σε μία συγκέντρωση απορρόφησης Ca^{2+} ίση με 1.8 mM, έδωσε την μεγαλύτερη παραγωγή λόγω ελαχιστοποίησης της συσσώρευσης Ca^{2+} στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα.

SIMULATION OF ACCUMULATION Ca IN CLOSED HYDROPONIC SYSTEM IN PEPPER CROP

Andreas Ropokis^{1,2}, Nicholas Katsoulas², Constantine Kittas², Anastasios Kotsiras³, Konstantina Lagou¹
Dimitrios Savvas¹

¹Department of Vegetable Crops, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens

²Laboratory of Agricultural Structures & Environmental Control, University of Thessaly, Fytokou Str., Volos

³Department of Crop Production of Agricultural Technology, T.E.I. of Kalamata, 24100, Kalamata

In most cases, nutrient/water uptake ratios from plants grown in soilless culture, known in the literature as uptake concentrations, have been measured under North-European conditions. However, the uptake concentrations in Mediterranean greenhouses may be different that those found in northern Europe, due to different climatic conditions. Therefore, the experimental determination of uptake concentrations is necessary to establish nutrient solutions for closed hydroponic systems operating under Mediterranean climatic conditions. The purpose of this research was to develop a mathematical model aimed at predicting the accumulation of Ca^{2+} in the recirculating nutrient solution and the Ca^{2+} uptake concentration in pepper crops grown in closed hydroponic systems under Mediterranean climatic conditions as a relationship of the Ca^{2+} concentrations in the supplied nutrient solution. Four different Ca^{2+} concentrations (1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 mM) in the supplied nutrient solution were applied. The results showed that in a closed hydroponic cultivation of sweet pepper, the lowest Ca^{2+} supply level, which imposed a mean uptake concentration of 1.8 mM, resulted in the highest yield due to minimal Ca^{2+} accumulation in the recirculating nutrient solution.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αναλογίες απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων ως προς το νερό, γνωστές στην σχετική διεθνή βιβλιογραφία ως συγκεντρώσεις απορρόφησης (Adams, 2002), έχουν προσδιοριστεί κυρίως σε θερμοκήπια της Βόρειας Ευρώπης. Ωστόσο οι συγκεντρώσεις απορρόφησης σε θερμοκήπια Μεσογειακών περιοχών δεν ταυτίζονται με αυτές της Βόρειας Ευρώπης, λόγω διαφορετικών κλιματικών συνθηκών. Συνεπώς, ο πειραματικός προσδιορισμός των συγκεντρώσεων απορρόφησης είναι αναγκαίος για να μπορεί να καταστρωθεί ένα θρεπτικό διάλυμα με κατάλληλη σύσταση για κλειστά υδροπονικά συστήματα σε μεσογειακά θερμοκήπια (Savvas, 2002). Ο σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι να μελετηθούν οι σχέσεις μεταξύ του ρυθμού συσσώρευσης καθώς και της συγκέντρωσης απορρόφησης του Ca^{2+} σε μία κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πιπεριάς και της συγκέντρωσης του Ca^{2+} στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης.

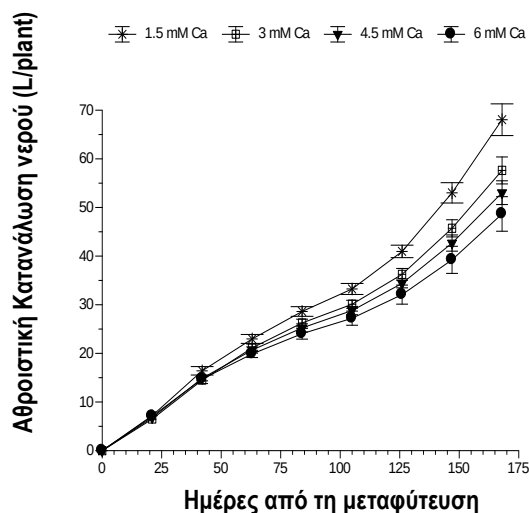
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο

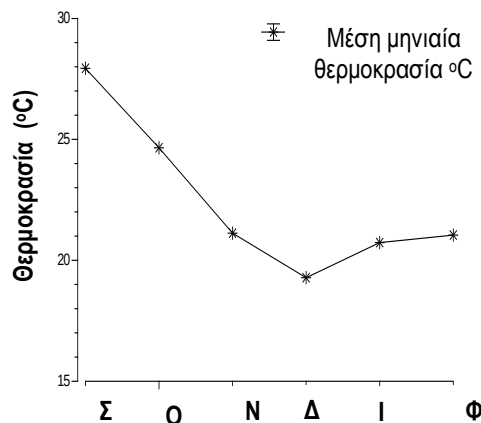
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο υαλόφρακτου θερμοκηπίου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (γεωγραφικό πλάτος 37° 58' 55'', γεωγραφικό μήκος 23° 32' 14'', υψόμετρο 30 m). Στο θάλαμο υπήρχε πειραματική εγκατάσταση N.F.T. (Nutrient Film Technique) που περιλάμβανε 20 αυτοτελή κλειστού τύπου υδροπονικά συστήματα (πειραματικές μονάδες). Κάθε αυτοτελές υδροπονικό σύστημα συνίστατο από ένα κανάλι, ένα δοχείο παροχής θρεπτικού διαλύματος (ΘΔ), το οποίο ταυτόχρονα λειτουργούσε και ως κανάλι συλλογής του ΘΔ που επέστρεφε για να ανακυκλωθεί, καθώς και ένα δοχείο αναπλήρωσης του ΘΔ που απορροφούσαν τα φυτά. Το κάθε κανάλι είχε μήκος 3 μέτρα (m), πλάτος 0,03 m και βάθος 0,015 m και ήταν επενδυμένο εσωτερικά με ασπρόμαυρο πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου. Εντός της πλαστικής επένδυσης κάθε καναλιού μεταφυτεύθηκαν 9 φυτά πιπεριάς σε πυκνότητα που

αντιστοιχούσε σε 2,5 φυτά/m² τα οποία αρδεύονταν συνεχώς μέσω μίας λεπτής στοιβάδας θρεπτικού διαλύματος. Η πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων και νερού αντισταθμιζόταν με αυτόματη είσοδο ΘΔ από το δοχείο αναπλήρωσης μέσω ενός πλωτήρα (φλοτέρ) που διατηρούσε σταθερή την στάθμη του ΘΔ στο δοχείο παροχής και συλλογής των απορροών. Η σύσταση του ΘΔ συμπλήρωσης

βασιζόταν στις συγκεντρώσεις απορρόφησης που δίνονται από τον Σάββα (2012) για καλλιέργειες πιπεριάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα υπό συνθήκες μεσογειακού κλίματος. Το ΘΔ που καταναλωνόταν από τα φυτά καταγράφονταν καθημερινά και συμπληρωνόταν στο δοχείο αναπλήρωσης (Σχ. 1).



Σχ. 1. Η εξέλιξη της αθροιστικής κατανάλωσης νερού (L/plant) συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες από τη μεταφύτευση) για 4 διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης Ca²⁺ στο νερό άρδευσης, σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Οι κάθετες μπάρες δείχνουν τα ± τυπικά σφάλματα των μέσων.



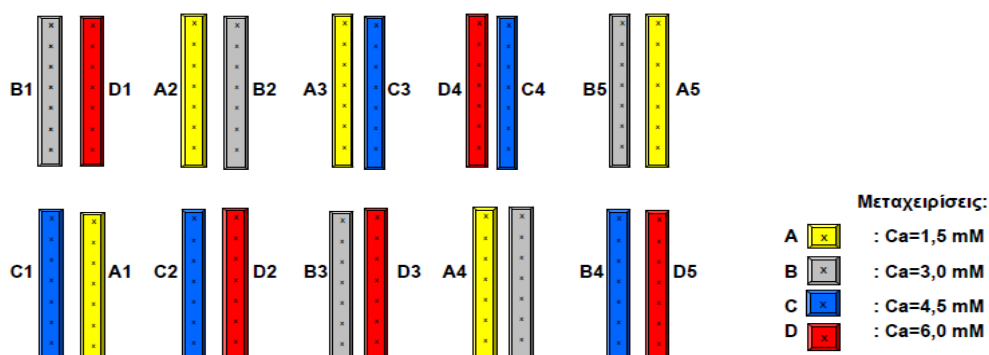
Σχ. 2. Η εξέλιξη της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας Τ (°C) εντός του θαλάμου του θερμοκηπίου με καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, συναρτήσει του χρόνου (σε μήνες από τη μεταφύτευση).

Η θερμοκρασία εντός του θαλάμου του θερμοκηπίου καταγράφονταν. Το Σχ. 2 δείχνει την εξέλιξη της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας Τ (°C) εντός του θαλάμου του θερμοκηπίου συναρτήσει του χρόνου. Το pH του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ρυθμιζόταν καθημερινά στο 6.20 με την προσθήκη κατάλληλων ποσοτήτων 1 N διαλύματος HNO₃, κατόπιν μέτρησής με ένα φορητό όργανο μέτρησης του pH (PH 25 Crison Instruments SA, Ισπανία).

2.2. Η καλλιέργεια

Φυτά γλυκιάς πιπεριάς τύπου «κέρατο» (*Capsicum annuum*, cv Sammy F1) του σποροπαραγωγικού οίκου Rijk Zwaan, σπάρθηκαν στις 03/08/2012. Τα σπορόφυτα που προέκυψαν μεταφύτευθηκαν στο στάδιο των τεσσάρων

πραγματικών φύλλων στα 20 κλειστά υδροπονικά συστήματα τύπου NFT στις 11/09/12. Ακολούθως ξεκίνησε η ανακύκλωση του διαλύματος απορρόφησης, με το πείραμα να διαρκεί μέχρι τις 25/02/2013. Σε κάθε φυτό αφέθηκαν δύο βλαστοί οι οποίοι υποστυλώθηκαν με κατακόρυφο σπάγκο, ενώ οι υπόλοιποι πλάγιοι βλαστοί κλαδεύονταν στο πρώτο φύλλο. Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας εφαρμόστηκε δόνηση των ανθέων με την βοήθεια φορητού ηλεκτρικού δονητή ώστε να υποβοηθηθεί η φυσική καρπόδεση. Στο πείραμα εφαρμόστηκαν 4 πειραματικές επεμβάσεις, οι οποίες αντιστοιχούσαν στις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca²⁺ στο νερό άρδευσης (1.5, 3.0, 4.5 και 6.0 mM Ca²⁺). Για κάθε μεταχείριση υπήρχαν 5 επαναλήψεις, κατανεμημένες στο χώρο του θερμοκηπίου με βάση το σχέδιο των τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων (Σχ. 3).



Σχ. 3. Διάταξη των τεσσάρων μεταχειρίσεων εντός του θαλάμου του γυάλινου θερμοκηπίου.

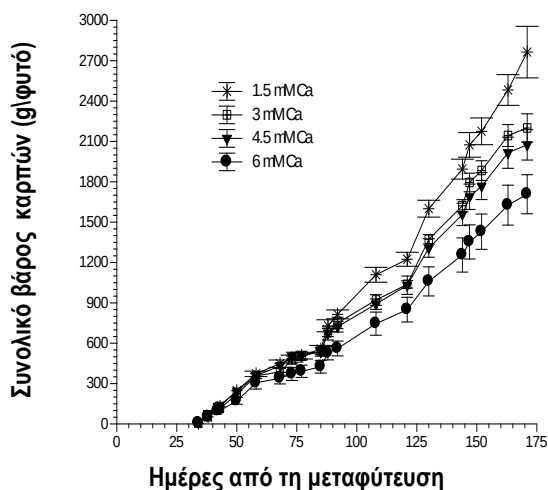
2.3. Μετρήσεις

Δείγματα από το ανακυκλούμενο ΘΔ λαμβάνονταν κάθε τρεις εβδομάδες από όλες τις πειραματικές μονάδες, ξεκινώντας από την 11η Σεπτεμβρίου. Τα δείγματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων Ca^{2+} με την βοήθεια ενός φασματοφωτόμετρου ατομικής απορρόφησης (Perkin Elmer 1100B). Η μέση συκέντρωση απορρόφησης του x θρεπτικού στοιχείου (C_{xu} σε mmol L^{-1} ή $\mu\text{mol L}^{-1}$, όπου $x = \text{Ca}^{2+}$) προσδιορίστηκε για 8 διαδοχικά χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

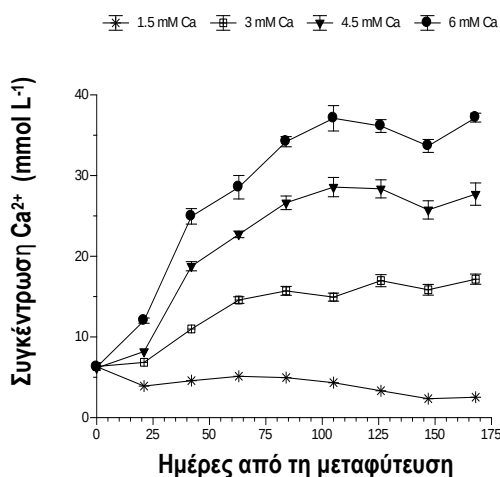
$$C_{xu} = \frac{V_r(C_{xbi} - C_{xei}) + V_{ui}C_{xa}}{V_{ui}} \quad (1)$$

όπου V_r είναι ο συνολικός όγκος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος σε κάθε πειραματική μονάδα, V_{ui} είναι ο συνολικός όγκος του θρεπτικού διαλύματος που απορροφήθηκε από τα φυτά κάθε πειραματικής μονάδας κατά τη διάρκεια του i διαδοχικού μεσοδιαστήματος ($i = 1 \dots 8$), C_{xbi} και C_{xei} είναι οι συγκεντρώσεις του x θρεπτικού στοιχείου ($x = \text{Ca}^{2+}$ στο παρόν πείραμα) στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα κατά την πρώτη και την τελευταία ημέρα των i διαδοχικών μεσοδιαστημάτων και C_{xa} είναι η συκέντρωση του x θρεπτικού στοιχείου στο θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων και του νερού σε κάθε μεταχείριση (Tzerakis et al, 2013).

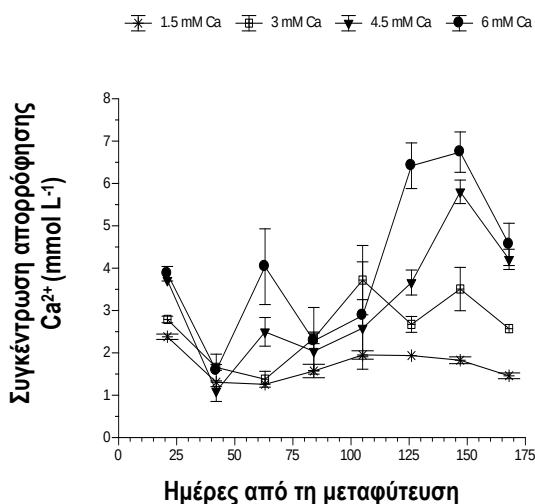
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχ. 4. Συνολικό βάρος καρπών ανά φυτό πιπεριάς καλλιεργούμενο εντός κλειστού υδροπονικού συστήματος με 4 διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης Ca^{2+} στο νερό άρδευσης, συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες από τη μεταφύτευση). Οι κάθετες μπάρες δείχνουν τα $\pm$ τυπικά σφάλματα των μέσων.



Σχ. 5. Συσώρευση Ca^{2+} (mmol L^{-1}) στο διάλυμα απορροής συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες από τη μεταφύτευση) για 4 διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης Ca^{2+} στο νερό άρδευσης, σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Οι κάθετες μπάρες δείχνουν τα $\pm$ τυπικά σφάλματα των μέσων.

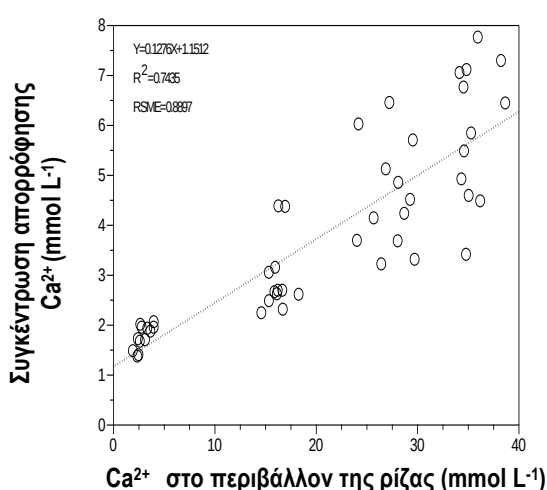


Σχ. 6. Διακυμάνσεις της συγκέντρωσης απορρόφησης Ca^{2+} (mmol L⁻¹) στο διάλυμα απορρόφησης συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες) για 4 διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης Ca^{2+} στο νερό άρδευσης, σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Οι κάθετες μπάρες δείχνουν τα $\pm$ τυπικά σφάλματα των μέσων.

Σύμφωνα με το Σχ. 1, οι διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca^{2+} στο ΘΔ οδήγησαν σε σημαντικές διαφορές στην κατανάλωση νερού από τα φυτά. Ειδικότερα, όσο υψηλότερη ήταν η συγκέντρωση Ca^{2+} στο χορηγούμενο ΘΔ τόσο χαμηλότερη ήταν η κατανάλωση νερού.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων επίσης φαίνεται ότι στη μεταχείριση 1.5 mM Ca^{2+} το συνολικό βάρος των καρπών ανά φυτό πιπεριάς ήταν από την 110^η ημέρα μετά την μεταφύτευση και μέχρι το τέλος του πειράματος στατιστικά μεγαλύτερο από τις άλλες μεταχειρίσεις (3.0, 4.5 και 6.0 mM) και ξεπέρασε τα 2,7 kg στο τέλος της καλλιέργειας (Σχ. 4). Αντίθετα, στις μεταχειρίσεις 3.0 και 4.5 mM Ca^{2+} , το συνολικό βάρος καρπών ανά φυτό πιπεριάς στο τέλος της καλλιέργειας δεν διέφερε στατιστικά και κυμάνθηκε μεταξύ 2,1 και 2,2 kg αντίστοιχα. Τέλος, η μικρότερη συνολική παραγωγή καρπών ανά φυτό (1,7 kg) συγκομίσθηκε από την μεταχείριση με το υψηλότερο επίπεδο Ca^{2+} στο νερό άρδευσης (6.0 mM) με εμφάνιση στατιστικά σημαντικής διαφοράς σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις 3.0 και 4.5 mM Ca^{2+} από την 110^η ημέρα.

Ο ρυθμός της συσσώρευσης του Ca^{2+} (mmol L⁻¹) στο περιβάλλον των ριζών για τις μεταχειρίσεις 3.0, 4.5 και 6.0 mM στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας ήταν αργός, αλλά στη συνέχεια αυξήθηκε προοδευτικά έως την 126^η ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης. Μετά από αυτό το χρονικό ορόσημο, η περαιτέρω συσσώρευση Ca^{2+} πρακτικά άρχισε να μηδενίζεται (Σχ. 5), προφανώς επειδή από αυτό το χρονικό σημείο και μετά η αναλογία απορρόφησης Ca^{2+} /νερό προσέγγισε την αντίστοιχη αναλογία



Σχ. 7. Σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων του Ca^{2+} στο διάλυμα απορρόφησης και των αναλογιών πρόσληψης ιόντων Ca^{2+} /νερού (συγκεντρώσεις απορρόφησης) σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Τα σύμβολα υποδεικνύουν μετρούμενες τιμές ενώ η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει την καμπύλη παλινδρόμησης υποθέτοντας μια γραμμική συσχέτιση.

εισόδου τους (συγκέντρωση Ca^{2+} στο διάλυμα συμπλήρωσης της αντίστοιχης μεταχείρισης). Για τη μεταχείριση με το μικρότερο επίπεδο Ca^{2+} (1.5 mM) ο ρυθμός της συσσώρευσης του Ca^{2+} στο περιβάλλον των ριζών ήταν στην αρχή αρνητικός, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι στη μεταχείριση αυτή η συγκέντρωση Ca^{2+} του αρχικού ΘΔ είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση Ca^{2+} στο ΘΔ συμπλήρωσης, ενώ μετά από την 126^η ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης δείχνει και αυτή να σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει ότι συσσώρευση Ca^{2+} στο περιβάλλον των ριζών από εκείνη την ημέρα και μετά πρακτικά μηδενίζεται.

Στο Σχ. 6, φαίνεται η εξέλιξη της συγκέντρωσης απορρόφησης Ca^{2+} (mmol L⁻¹) στο διάλυμα απορρόφησης συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες) για 4 διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης Ca^{2+} στο νερό άρδευσης. Η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης Ca^{2+} /νερού (Y) και της συγκέντρωσης των κατιόντων Ca^{2+} στο περιβάλλον της ρίζας (X) παρουσιάζεται στο Σχ. 7 και δίνεται από την εξίσωση:

$$Y = 0.1276X + 1.1512 \quad (R^2 = 0.7435) \quad (2)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπολογίστηκε με γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας ως ζεύγη τιμών τις συγκεντρώσεις Ca^{2+} που μετρήθηκαν στο διάλυμα απορρόφησης στις τρεις τελευταίες δειγματοληψίες και τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις Ca^{2+} στο νερό άρδευσης. Δοκιμάστηκαν και άλλες εξισώσεις ως πρότυπα (π.χ. $Y = ax^b$) αλλά δεν έδωσαν καλύτερες προβλέψεις.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μέχρι σήμερα πρότυπες συστάσεις για επίπεδα Ca σε (ΘΔ) που χρησιμοποιούνται σε ανοικτές και κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες πιπεριάς για να αντισταθμίσουν την απορρόφηση τους από τα φυτά, βασίζονται κυρίως στην έρευνα που διεξάγεται στην Ολλανδία (de Kreijl et al., 1999, Sonneveld, 2009). Ωστόσο, δεδομένα που να δείχνουν τις αναλογίες απορρόφησης μεταξύ των μαζών των θρεπτικών στοιχείων και του όγκου του νερού σε κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες πιπεριάς που αναπτύσσονται σε συνθήκες Μεσογειακού κλίματος δεν είναι διαθέσιμα στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων και του νερού από τα φυτά δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται ανάλογα κυρίως με το είδος και το στάδιο ανάπτυξης του φυτού και τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (Adams and Massey, 1984, van Goor et al., 1988, Savvas and Lenz, 1995, Sonneveld, 2002, κ.λ.π.). Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεγαλύτερη συνολική παραγωγή καρπών σε κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες πιπεριάς επιτυγχάνεται όταν η συγκέντρωση Ca^{2+} στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης είναι η μικρότερη (1.5 mM) από τις τέσσερις συγκεντρώσεις που δοκιμάστηκαν στο παρόν πείραμα. Το γεγονός ότι σε αυτή την μεταχείριση παρατηρήθηκε η υψηλότερη κατανάλωση νερού υποδηλώνει έμμεσα ότι τα φυτά αυτής της μεταχείρισης είχαν πιο εκτεταμένη φυλλική επιφάνεια και συνεπώς καλύτερη βλαστική ανάπτυξη. Η μείωση της παραγωγής καρπών στις μεταχειρίσεις με συγκέντρωση Ca^{2+} ίση με 3, 4,5 ή 6 mM σε σύγκριση με 1,5 mM, αποδίδεται στην συσσώρευση Ca^{2+} που προκάλεσαν αυτές και συνεπώς σε φαινόμενα αλατούχου καταπόνησης. Τέλος επισημαίνεται ότι, όπως φαίνεται από την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ($R^2 = 0.7435$) στην εξίσωση (2), η γραμμική συσχέτιση που προέκυψε από την παρούσα εργασία προσομοιώνει ικανοποιητικά την συγκέντρωση απορρόφησης του Ca^{2+} ως συνάρτηση της συγκέντρωσης Ca^{2+} στο περιβάλλον της ρίζας, όταν η τελευταία κυμαίνεται από 1.5 έως 38 mmol L⁻¹.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, βαθμονομήθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο σε μια φθινοπωρινή-χειμερινή καλλιέργεια γλυκιάς πιπεριάς υπό κάλυψη, το οποίο προσομοιώνει τη συγκέντρωση απορρόφησης του Ca^{2+} (βάρος του θρεπτικού ιόντος ανά λίτρο νερού που απορροφάται) σε συνάρτηση με την συγκέντρωση των κατιόντων Ca^{2+} στο διάλυμα

απορρόφης. Το παραπάνω μοντέλο, αφού ελεγχθεί ως προς την αξιοπιστία του και σε μια δεύτερη καλλιέργεια, ώστε η επαλήθευσή του να είναι ανεξάρτητη από την βαθμονόμησή του, μπορεί μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί σε “ευφυή” συστήματα αυτόματης διαχείρισης της υδρολίπανσης σε καλλιέργειες γλυκιάς πιπεριάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα κάτω από συνθήκες Μεσογειακού κλίματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adams, P., Massey, D.M., 1984. Nutrient uptake by tomatoes from recirculating solutions. In: Proceedings, 6th International Congress on Soilless Culture. ISOSC, Wageningen, The Netherlands, pp. 71-79.
- Adams, P. 2002. Nutritional control in hydroponics. In: Savvas, D., Passam, H.C. (eds.). Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publ., Athens, Greece, pp. 211-261.
- De Kreijl, C., Voogt, W. and Baas, R. 1999. Nutrient solution and water quality for soilless cultures. Brochure 196. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables PBG Naaldwijk, The Netherlands, 32pp.
- Savvas, D., Lenz, F., 1995. Nährstoffaufnahme von Aubergine (*Solanum melongena* L.) in Hydrokultur. Garten-bauwissenschaft 60, pp. 29-33.
- Savvas, D., 2002. Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. Biosyst. Engin., 83: 225 – 236.
- Sonneveld, C., 2002. Composition of nutrient solutions. In: Savvas, D., Passam, H. (eds.). Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 179-210.
- Sonneveld, C., Voogt, W. 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer, Dordrecht Heidelberg, London, New York. 431 p.
- Tzerakis, C., Savvas, D., Sigrimis, N., Mavrogianopoulos, G., 2013. Uptake of Mn and Zn by cucumber grown in closed hydroponic systems as influenced by the Mn and Zn concentrations in the supplied nutrient solution. Hort-Science 48 (3), 373-379 p.
- Van Goor, B..J., de Jager, A., Voogt, W., 1988; Nutrient uptake by some horticultural crops during the growing period. In: Proceedings, 7th International Congress on Soilless Culture. ISOSC, Wageningen, The Netherlands, pp. 163-176.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΣΕ ΗΜΙΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

¹Νικόλαος Κατσούλας, ²Δημήτριος Σάββας, ³Θωμάς Μπαρτζάνας, ¹Κωνσταντίνος Κίττας

¹Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος

²Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα

³Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Α ΒΙΠΕ Βόλου, 38500, Βόλος

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αποτελεσματικότητα ενός αυτόματου συστήματος διαχείρισης των απορροών σε ένα ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα. Η διαχείριση γίνεται με βάση την πρόβλεψη της συγκέντρωσης Na^+ ($[\text{Na}^+]$). Για το σκοπό αυτό, σε θερμοκήπιο με κάλυψη από φύλλο πολυαιθυλενίου στην περιοχή του Βελεστίνου, εγκαταστάθηκε καλλιέργεια τομάτας και εφαρμόστηκαν τρεις μεταχειρίσεις με βάση τον τρόπο διαχείρισης των απορροών: (α) ημίκλειστο σύστημα (απόρριψη του διαλύματος απορροής όταν η $[\text{Na}^+]$ ξεπερνούσε το όριο των 15 mM με στόχο κλάσματος απορροής 30%, (β) ημίκλειστο σύστημα (απόρριψη του διαλύματος απορροής όταν η $[\text{Na}^+]$ ξεπερνούσε το όριο των 15 mM με στόχο κλάσματος απορροής 60% και (γ) ανοιχτό σύστημα με στόχο κλάσματος απορροής 30%. Οι τιμές $[\text{Na}^+]$ που μετρήθηκαν συγκρίνονται με αυτές που προσομοιώθηκαν και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν συζητούνται στην εργασία αυτή. Η αύξηση του ρυθμού απορροής στο ημίκλειστο σύστημα από 30% σε 60% οδήγησε στην δημιουργία ευνοϊκότερων συνθηκών στο περιβάλλον της ρίζας των φυτών, όπως φαίνεται από τις χαμηλότερες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη μεταχείριση του 60% σε σχέση με την περίπτωση του 30% απορροής. Παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα χρήσης νερού παρατηρήθηκε στην περίπτωση του ημίκλειστου συστήματος με 30% κλάσμα απορροής.

Λέξεις κλειδιά: θερμοκήπιο, διαχείριση θρεπτικού διαλύματος, τομάτα, κατανάλωση νερού

DEVELOPMENT AND TEST OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MANAGEMENT OF THE DRAINAGE SOLUTION IN SEMI-CLOSED HYDROPONIC SYSTEMS

Nikolaos Katsoulas¹, Dimitrios Savvas², Thomas Bartzanas³, Constantinos Kittas¹

¹University of Thessaly, Dept of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Fytokou Str, 38446, Volos, Greece, nkatsoul@uth.gr

²Agricultural University of Athens, Dept of Crop Science, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece

³Center for Research and Technology – HELLAS (CERTH), Institute for Research and Technology-Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, PO Box 15, 38500 Volos-Greece

A decision-support system for management of the drainage water in semi-closed hydroponic systems, based on a Na^+ mass-balance model and measurements of plant water consumption, was developed and tested. For this purpose, experiments were carried out from February to July 2012 in a polyethylene covered greenhouse located at the experimental farm of the University of Thessaly in Greece. A tomato crop grown in an open system (O) with a drainage fraction of about 30% was compared with crops grown in semiclosed (SC) systems with drainage fractions of 30% and 60%. The results showed that the model included in the decision support system of the greenhouse, for management of hydroponic systems fertigation, could be successfully used for the control of Na^+ concentration in the nutrient solution. The increase of drainage fraction in the SC system from 30% to 60% helped to keep better conditions in the root zone, as indicated by the lower EC of the drainage solution as compared to the SC-30% system, and resulted to higher crop production. However, the higher water use efficiency was observed under the SC-30% treatment, while the fertilisers discharged were also less under the same treatment than under the O or SC-60% treatments.

Keywords: Greenhouse, nutrient solution management, tomato, crop water consumption

1. INTRODUCTION

Various constraints concerning sustainability and quality also apply to vegetables and ornamentals produced in protected cultivations. Sustainable horticultural production nowadays requires less pesticides and mineral pollution, without loss of yield and product quality. Greenhouse growers routinely apply more irrigation water to the crops than the water requirement in open field. Improper irrigation management practices not only waste scarce and expensive water resources but also decrease

marketable yield and economic return (Katsoulas et al., 2006; Montero, 2006).

The open irrigation system in soilless culture is still the most popular system, and at least 10–15% of the water and nutrients are lost from the root environment during low light period and 30–50% during the high light period to avoid salt accumulation. For environmental reasons, re-use of drained irrigation water is desirable and will become a common practice in the near future. The recirculation of the nutrient solution, however, leads

to accumulation of nutrients and high salinity, which requires a flushing rate of 30% or more of the nutrient solution.

Irrigation water in Mediterranean countries is usually characterized by high salt concentrations, including not only Na^+ and Cl^- but also Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- and SO_4^{2-} . Hence, in most cases, the quality of the available irrigation water in terms of mineral composition is incompatible with the application of completely closed hydroponic systems (Savvas, 2002; van Os et al., 2008). Consequently, to enable Mediterranean growers to adopt recycling of the excess irrigation water, henceforth termed drainage water, efficient solutions have to be found to minimize salt accumulation.

To overcome the problem of salt accumulation, the intermittent closure of the systems (application of semi-closed soilless culture systems) can be applied, which, though do not eliminate can considerably restrict the waste of irrigation water (Carmassi et al., 2005). However, to efficiently apply a semi-closed soilless cultivation system, technology specifically adapted to the Mediterranean types of irrigation water rich in Na^+ but also in Ca^{++} and climatic conditions has to be developed (Pardossi et al., 2006). In a recent paper, Katsoulas et al. (2012) presented an extended version of a mass-balance model initially developed by Savvas et al. (2005, 2007), which was used in semi-closed hydroponic systems to automatically discharge drainage water (DW) when the Na^+ level in the root zone exceeded a preset threshold.

Furthermore, previous research has indicated that an increase in the volume of nutrient solution per plant that is maintained in a closed hydroponic system slows down the process of Na^+ and Cl^- accumulation in the root zone of the plants (Savvas et al., 2007). Maintaining a higher volume of nutrient solution per plant in a closed-loop soilless cultivation is possible by increasing the drainage percentage, i.e. by higher volume of irrigation solution per irrigation event while not altering the standard irrigation frequency, to maximize salt leaching from the root environment. The increased leaching of salts from the root environment could reduce the mean Na^+ concentration in the root zone during the intervals between two irrigation events, thereby mitigating the impact of Na^+ accumulation, due to recycling on yield performance. This strategy is feasible when the DW is recycled, since an increased leaching fraction does not result in increased waste of nutrients and water.

The present paper reports on the effect of two drainage fractions applied using the decision support system (DSS) presented by Katsoulas et al. (2012) on crop yield and water and fertilisers use efficiency in semiclosed hydroponic systems.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Greenhouse facilities and plant material

The experiments were performed in a single span, arched roof, polyethylene covered

greenhouses, N-S oriented, located at the University of Thessaly near Volos, (Velestino: Latitude $39^\circ 22'$, longitude $22^\circ 44'$, altitude 85 m) on the continental area of eastern Greece, from February to June of 2012. The geometrical characteristics of the greenhouse were as follows: eaves height of 2.4 m; ridge height of 4.1 m; total width of 8 m; total length of 20 m; ground area of 160 m^2 , and volume of 572 m^3 . The greenhouse was equipped with two side roll-up vents and a flap roof vent. Heating was achieved by means of PVC pipes ($\varnothing 0.2 \text{ m}$) located above ground, near plants' substrate and by means of a fan-coil air heater located at a height of 2.6 m at the north side of the greenhouse. Greenhouse soil was totally covered by white (water permeable) mulch.

The tomato crop (*Lycopersicon esculentum*, cv. Formula) was transplanted during the 17th of February 2012, in rockwool slabs (1 m long, 0.15 m wide, 0.07 m height) placed in 6 independent closed-cycle hydroponic installations (experimental units). Each of the 6 hydroponic units comprised a tank and a pump for nutrient solution supply, a drip irrigation system, a channel, a pipe and a tank for capture and storage of the drainage solution. Each channel, which was 16 m in length, was fixed with a slope of 1% at a height of 0.5 m above the greenhouse ground and accommodated 34 tomato plants distributed over 15 slabs.

A fertigation head, specially designed for this experiment was used to supply nutrient solution, henceforth termed irrigation solution (IS), independently to each experimental unit. The fertigation head comprised six different pumps and supply ducts to avoid mixing of IS from different experimental units. The drainage water collected at the end of each channel, returned to the fertigation head and automatically blended with a standard nutrient solution to form IS. The whole process was controlled automatically through an on-line operating decision support system (DSS) that was part of the fertigation head (ARGOS Electronics s.a. Athens). The pH of the IS was adjusted to 5.6 in all treatments using nitric acid.

The frequency of IS supply via the drip irrigation system was automatically controlled in relation to crop transpiration (E , W m^{-2}) which was calculated as a function of solar radiation (R_g , W m^{-2}) and vapour pressure deficit (D , kPa) [$E = A f_1(\text{LAI}) R_g + B f_2(\text{LAI})$], (Katsoulas et al., 1999), with A and B estimated using previously collected data sets of E , R_g and D], measured by a pyranometer and a temperature and humidity sensor, respectively. Irrigation was performed whenever crop transpiration exceeded 0.2 kg per plant and the dose applied aimed at maintaining a drainage fraction of 30% or 60%.

Three treatments differing in the management of the DS and in the drainage fraction were applied in duplicate in the six experimental units:

- a standard open hydroponic system (O), with a drainage fraction of 30%,
- a semi-closed hydroponic system (SC-30%), with a drainage fraction of 30%,

- a semi-closed hydroponic system (SC-60%), with a drainage fraction of 60%.

The DS of the open system was constantly discharged throughout the experiment while for the SC systems the DS was recycled as long as the Na concentration in the system was lower than 15 mM. As soon as the threshold exceeded, the drainage solution was discharged. The EC in the drainage solution was automatically monitored through an EC-sensor connected to the controlling system, while the Na concentration was simulated using a previously established model (Savvas *et al.*, 2005; Varlagas *et al.*, 2010), as presented by Katsoulas *et al.* (2012; 2013). The target EC value of the IS in the open systems was 2.8 dS m⁻¹ while the target EC value of the fresh solution added to the drainage collected in the semiclosed systems was 2.4 dS m⁻¹. The concentration of Na in the fresh irrigation water was 1.1 mM. To obtain irrigation water containing 2 mM NaCl in the nutrient solution, the required quantity of NaCl was automatically computed and injected whenever fresh nutrient solution was prepared.

2.2. Measurements

Air temperature, relative humidity and solar global radiation were measured inside and outside the greenhouse by means of a temperature and humidity sensors (HD9009TR Hygrotransmitter, Delta OHM S.r.L., Padova, Italia), and two solar pyranometers (Middleton EP08-E, Brunswick, Victoria, Australia). Data were and recorded every 10 min using a data logger (ZENO@-3200, Coastal Environmental Systems, Inc., Seattle, WA). The volume of the irrigation water supplied to and drained by each treatment and each EC and pH values were recorded by the DSS. Using the above data the value of Na⁺ concentration in each treatment was calculated by the DSS using the Na⁺ mass balance model, as presented by Katsoulas *et al.* (2012; 2013) and shown in section 2.3.

Samples of nutrient solution were taken every 20 days for each replicate of the irrigation solution tanks, each block (sample from 3-4 slabs per block) and drainage solution tanks, for measurement of pH and EC, Na⁺ concentration (via flame photometry) and anion and cation concentrations (via HPLC).

Non destructive measurements [plant stem length, leaf number and length (L) of each leaf] was made in six randomly selected plants per replication distributed in two blocks, 10 times during the experimental period. A scanner (GT 9500, Epson, Nagano, Japan) was used to measure leaf area (LA), allowing correlation of LA to L, which was later used to estimate LA as a function of L measurement in each plant. Fruit harvesting took place twice a week, starting on April 2011. The harvested fruits from each block were weighted and the total production (kg m⁻²) was calculated for each treatment.

2.3. DSS Description

A mass balance model was used, that relates the concentration of Na in the recycled nutrient solution

with the cumulative uptake of water by the plants (Savvas *et al.*, 2005a, 2008). This model is based on the experimental determination of an empirical relationship between the concentration of Na⁺ in the root environment (C_{Nas}) and the respective Na⁺/water uptake ratio (C_{Nau}) by a particular plant species. According to Sonneveld *et al.* (1999) and Savvas *et al.* (2005b), the relationship between C_{Nas} and C_{Nau} may be a linear function but for most plant species cultivated in greenhouses is linear of the type:

$$C_{Nau} = aC_{Nas}^b \quad (1)$$

where a and b are constant values depending on the crop species.

When the entire amount drainage solution in a hydroponically-grown crop is collected and recycled, the only input of Na and water to the closed system originates from the net input of irrigation water while the only removal of Na from the system is through plant uptake. Thus the Na⁺/water input ratio is equal to the Na concentration in the irrigation water used to prepare nutrient solution (C_{Naw}), while the Na⁺/water input ratio is equal to C_{Nau} , which is commonly termed uptake concentration (Sonneveld, 2002). Under these conditions, any increase of C_{Nas} is proportional to the increase in the total water input to the crop (V_w) and to the difference between the rates of Na input and Na removal ($C_{Naw} - C_{Nau}$), and reversely proportional to the total volume of nutrient solution included in the closed system (V_s). Mathematically, this relationship is written in form of a mass balance equation as follows:

$$dC_{Nas} = dV_w(C_{Naw} - C_{Nau})/V_s \quad (2)$$

Rearranging Eq. (2), one obtains the following differential equation:

$$dC_{Nas} / dV_w = (C_{Naw} - C_{Nau})/V_s \quad (3)$$

Replacing (1) in (3) one obtains:

$$dC_{Nas} / dV_w = (C_{Naw} - aC_{Nas}^b)/V_s \quad (4)$$

In Eqn (4), C_{Nas} is a variable indicating the accumulation of Na in the closed system, V_w is an increasing variable that can be automatically monitored using suitable equipment, C_{Naw} is a known constant through a chemical analysis, and V_s is a value that remains roughly constant through the cropping period. Furthermore, a and b have been determined experimentally for tomato (Varlagas *et al.*, 2010). Thus, (4) can be used to predict C_{Nas} as a relationship of the constantly monitored variable V_w . In the general case, there is no analytical solution satisfying the differential equation (4) and, therefore, Savvas *et al.* (2005a) applied a numerical method according to Butcher (1987).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Water Consumption

The irrigation events were the same for all treatments. However, the water applied was 0.286 mL per plant for the open (O) and the semi-closed hydroponic system with the drainage fraction of 30%, (SC-30%), and 0.500 mL per plant for the semi-closed hydroponic system with the drainage fraction

of 60%, (SC-60%). Thus, the cumulative volume of the irrigation solution (IS) supplied to the crop was $0.720 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ for the O, $0.715 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ for the SC-30%, and $1.172 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ for the SC-60% treatments. The evolution of the cumulative volume of the nutrient solution that was consumed by the crop in the three treatments is shown in Fig. 1. It can be seen that the crop with 60% drainage seems to have absorb more water than the other two treatments which means that the higher drainage fraction led to higher water availability and better root zone conditions.

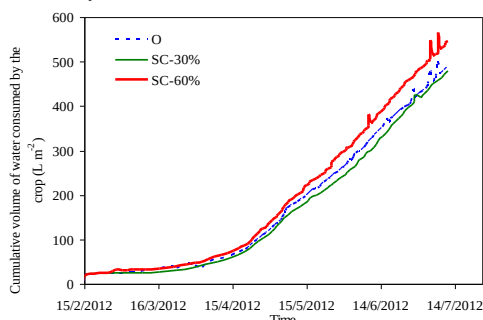


Fig. 1. Dynamics of cumulative volume of nutrient solution absorbed by the crop for the three hydroponic systems during the experimental period.

The drained solution (DS) collected and discharged in the O treatment was about $0.233 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$, with mean value of EC of 4.8 dS m^{-1} . The mean value of the ratio of IS supplied to the DS collected in the O treatment was about 0.33.

The DS collected in the SC-30% & 60% treatments was about $0.235 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ & $0.625 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$, respectively, with mean value of EC of 6.6 dS m^{-1} and 5.4 dS m^{-1} , respectively. The drainage collected in SC-30% & 60% was discharged whenever the Na^+ concentration of system was higher than 15 mmol L^{-1} . Thus, while in the open system all the drainage solution collected was discharged; the volume of DS discharged for the SC-30% & 60% treatments was $0.050 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ & $0.064 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$, respectively.

Taking into account the above, it can be calculated that the total volume of fresh water consumed for the SC-30% and SC-60% treatments was about $0.530 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ and $0.611 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$, respectively, while the respective value for the open treatment was $0.720 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$.

3.2 Electrical Conductivity of Nutrient Solution

The target EC value of the nutrient solution mixed with the DS in the SC treatments to produce the IS was 2.4 dS m^{-1} while the target EC for the open treatment was 2.8 dS m^{-1} . The dynamics of the EC values of the drainage and the irrigation solution in the three treatments is shown in Fig. 2. It can be seen that after the end of April the EC of the drainage solution in the SC-30% system was about 8 dS m^{-1} while the respective value for the SC-60% was about 2 dS m^{-1} lower than that of SC-30%. The dynamics of the EC values of the drainage solution in the open system was similar to that of the SC-60% treatment with lower values from SC-60% during the last two

months of the experimental period. The EC of the IS can be calculated as the sum of (a) the drainage rate multiplied by the EC value of DS and (b) the percentage of fresh water used for the preparation of IS multiplied by the target EC of the fresh nutrient solution. It can be seen in Fig. 2 that the EC values of the irrigation solution were almost similar for the SC systems with the higher values being observed for the SC-60% system during the two last months of the experimental period. The respective EC values for the O system were almost constant near the target value of 2.8 dS m^{-1} .

3.3 Na^+ Concentration Measurements and Modelling

The dynamics of modelled by the DSS Na^+ concentration in the three treatments during the total experimental period, are shown in Fig. 3. It can be seen that Na^+ concentration in the SC-60% treatment was slightly lower than that of the SC-30% treatment. Na^+ concentration in the open hydroponic system was always lower than 5 mM and remained between the level of 3 mM to 5 mM during the whole experimental period. The respective values of Na^+ concentration in the SC systems progressively increased during the experimental period. Whenever the set point of 15 mM was reached the drained solution was discharged in order to decrease Na^+ concentration below 15 mM .

However, the modelled Na^+ values were always higher than the measured ones and the relationship found between measured and modelled values was: $\text{Modelled Na}^+ = 0.72 \times \text{Measured Na}^+ + 5.45$, with a determination coefficient of 0.80. The agreement between measured & modelled values was better for Na^+ concentration values were higher than 10 mM .

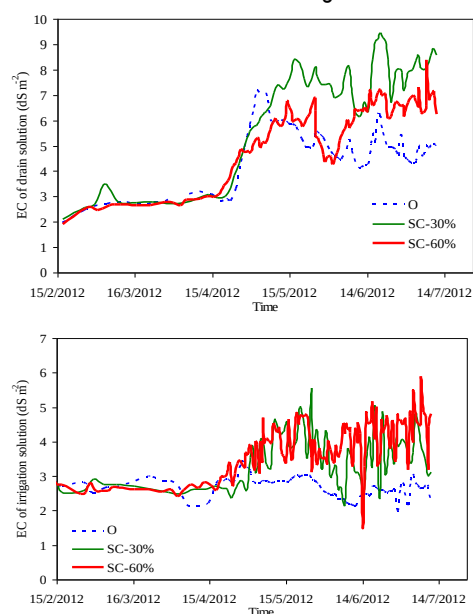


Fig. 2. Dynamics of EC values of (a) drainage solution and (b) irrigation solution during the experimental period.

3.4 Crop Production and Fertilisers Discharged

The evolution of plant height in the three treatments during the experimental period was similar

and the final height reached by the plants was near the 2.5 m for all treatments. As far as the total production is concerned, the values observed in the O, SC-30% and SC-60% treatments were 13.2 kg m⁻², 12.3 kg m⁻² and 12.8 kg m⁻², respectively.

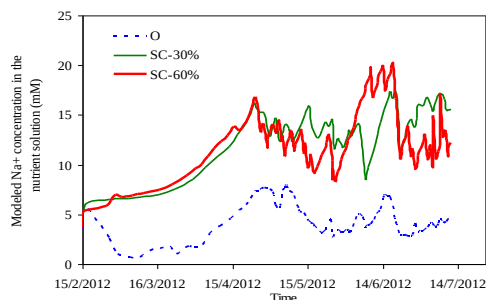


Fig. 3. Dynamics of Na⁺ concentration in the nutrient solution of the three hydroponic systems during the experimental period.

Taking into account the water consumed in each treatment and the production presented above, the water use efficiency (WUE) calculated for the O, SC-30% and SC-60% treatments was 19.3 kg m⁻³, 23.2 kg m⁻³ and 20.9 kg m⁻³, respectively, with the value for the SC-30% treatment being statistically significantly higher than the other two treatments.

4. CONCLUSION

The results showed that the model included in the decision support system of the greenhouse, for management of hydroponic systems fertigation, could be successfully used for the control of Na⁺ concentration in the nutrient solution. The increase of drainage fraction in the SC system from 30% to 60% helped to keep better conditions in the root zone, as indicated by the lower EC of the drainage solution as compared to the SC-30% system, and resulted to higher crop production. However, the higher water use efficiency was observed under the SC-30% treatment, while the fertilisers discharged were also less under the same treatment than under the O or SC-60% treatments.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the EU Seventh Framework Programme, within the project 'Sustainable use of irrigation water in the Mediterranean Region-SIRRIMED' (grant agreement no: 245159), which is carried out under the EFP7 Cooperation Theme 'Food, Fisheries & Biotechn'.

Literature Cited

- Butcher, J.C., 1987. The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge-Kutta and general linear methods. Wiley, London.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F. and Pardossi, A., 2005. Modelling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.*, 28: 431-445.
- Katsoulas, N., Kakavikakis, G., Kittas, C., Bartzanas, T. and Savvas, D. 2012. Performance test of a Na⁺ accumulation model as part of a decision support system for closed hydroponic systems management. *Acta Hort.*, 957: 139-145.

- Katsoulas, N., Savvas, D., Bartzanas, T., Kittas, C., 2013. Development and Evaluation of a DSS for Drainage Management in Semi-closed Hydroponic Systems. International Symposium on Growing Media and Hydroponics, 17-21 June 2013, Leiden, The Netherlands.
- Katsoulas, N., Kittas, C. and Baille, A., 1999. Estimating transpiration rate and canopy resistance of a rose crop in a fan-ventilated greenhouse. *Acta Hort.*, 548: 303-309.
- Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G. and Lykas, Ch., 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Biosyst. Engin.*, 93: 237-244.
- Montero, J. I., 2006. Evaporative cooling in greenhouses: Effect on microclimate, water use efficiency, and plant response. *Acta Hort.*, 719: 373-384.
- Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Carmassi, G., Maggini, R., Massa, D. and Tognoni, F., 2006. Simplified models for the water relations of soilless cultures: What they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. *Acta Hort.*, 718: 425-434.
- Savvas, D., Stamati, E., Tsirogiannis, I. L., Mantzos, et al., 2007. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in a closed-loop hydroponic system. *Agr. Wat. Manag.*, 91: 102-111.
- Savvas, D., 2002. Nutrient solution recycling. In: Savvas, D., and Passam H.C. (Eds). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Embryo Pub., Athens, Greece, pp. 299-343.
- Savvas, D., Pappa, V.A., Kotsiras, A. and Gizas, G., 2005a. NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *Europ. J. Hort. Sci.* 70: 217-223.
- Savvas, D., Kotsiras, A., Meletioui, G. Margariti, S. Tsirogiannis, I., 2005b. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience*, 40: 802-807.
- Sonneveld, C., R. Baas, H.M.C. Nijssen, and J. de Hoog. 1999. Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 22:1033-1048.
- Sonneveld, C., 2002. Composition of nutrient solutions, p. 179-210. In: D. Savvas and H.C. Passam (eds.). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece.
- Van Os, E., Gieling, T.H. and Lieth, H.J., 2008. Technical equipment in soilless production systems. In: Raviv, M., and Lieth, H.J. (Eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, pp. 157-207.
- Varlagas, H, Savvas, D., Mouzakis, G., Liotsos, C., Karapanos, I. and Sigrimis, N., 2010. Modelling uptake of Na⁺ and Cl⁻ by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agric. Wat. Manag.* 97: 1242-1250.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΧΤΥΟΚΗΠΙΩΝ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΓΛΥΚΙΑΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ

Νικόλαος Ρηγάκης¹, Νικόλαος Κατσούλας¹, Παναγιώτης Μπελιτσιώτης¹, Θωμάς Μπαρτζάνας² και Κωνσταντίνος Κίττας¹

¹Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, Νέα Ιωνία Μαγνησίας, Τ.Κ. 384446

²Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση τριών διαφορετικών διχτύων κάλυψης στο μικροκλίμα, στην ανάπτυξη και στην παραγωγή καλλιέργειας πιπεριάς και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την περίπτωση καλλιέργειας στον ανοικτό αγρό. Τα διχτυοκήπια καλύφθηκαν με τα εξής δίχτυα: (α) εντομοστεγανό δίχτυ (50-mesh), διάφανο, με ποσοστό σκίασης περίπου 13% ($IP_{13\%}$), (β) εντομοστεγανό δίχτυ (50-mesh), λευκό, με ποσοστό σκίασης περίπου 34% ($IP_{34\%}$) και (γ) δίχτυ σκίασης, πράσινο, με ποσοστό σκίασης περίπου 36% ($G_{36\%}$). Τα δίχτυα (α) και (β) είχαν το ίδιο πορώδες αλλά διαφορετικό ποσοστό σκίασης ενώ τα δίχτυα (β) και (γ) είχαν παρόμοιο ποσοστό σκίασης αλλά διαφορετικό πορώδες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μικροκλίματος έδειξαν μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από τις καλλιέργειες εντός των διχτυοκηπίων ανάλογη του ποσοστού σκίασης κάθε διχτυού, ενώ η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών του αέρα εντός των διχτυοκηπίων ήταν παρόμοια με εκείνα στον ανοικτό αγρό. Ωστόσο, η παρουσία των διχτύων βελτίωσε το μικροκλίμα των διχτυοκηπίων, όπως αυτό υποδεικνύεται από την μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα και του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών καλλιέργειας-αέρα. Εντός των διχτυοκηπίων παρατηρήθηκε αύξηση της συνολικής παραγωγής, σε σχέση με τον ανοικτό αγρό, κατά 78%, 30% και 7% στα διχτυοκήπια $IP_{13\%}$, $IP_{34\%}$ και $G_{36\%}$, αντίστοιχα. Η εμπορεύσιμη παραγωγή εντός των διχτυοκηπίων ήταν περίπου 90% επί της συνολικής έναντι 60% της αντίστοιχης στον ανοικτό αγρό. Επιπλέον, η ποιότητα της παραγωγής εντός των διχτυοκηπίων ήταν υψηλότερη σε σχέση με τον ανοικτό αγρό, καθώς συγκομίστηκαν μεγαλύτερου μεγέθους καρποί, σχεδόν εξαλείφθηκε το ηλιακό έγκαυμα των καρπών, μειώθηκε δραστικά η ξηρή σήψη κορυφής (BER), ενώ στα εντομοστεγανά διχτυοκήπια μειώθηκε και ο αριθμός των καρπών που είχαν σημάδια προσβολής από θρίπες.

Λέξεις κλειδιά: Δίχτυ σκίασης, δίχτυ εντομοστεγανότητας, παραγωγή, ποιότητα παραγωγής, ηλιακά εγκαύματα, ξηρά σήψη κορυφής.

SCREENHOUSE EFFECT ON MICROCLIMATE AND PRODUCTIVITY OF A SWEET PEPPER CROP

Nikolaos Rigakis¹, Nikolaos Katsoulas¹, Panagiotis Belitsiotis¹, Thomas Bartzanas² and Constantinos Kittas²

¹Laboratory of Agricultural Constructions and Environmental Control, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, GR-38446, Volos, Greece

²Institute of Research and Technology of Thessaly, Centre for Research and Technology Hellas
rigakis@uth.gr, nkatsoul@uth.gr, thomas.bartzanas@gmail.com, ckittas@uth.gr

In the present work, the influence of three different screens on microclimate, development and yield of a sweet pepper crop was investigated and the results were compared to those of an open field crop. Screenhouse frames were covered with the following nets: (a) clear insect-proof net (50-mesh) with shading factor 13% ($IP_{13\%}$), (b) white insect-proof net (50-mesh) with shading factor 34% ($IP_{34\%}$) and (c) green shade net with shading factor 36% ($G_{36\%}$). Nets (a) and (b) had same porosity but different shading factor, while (b) and (c) had same shading factor but different porosity. Microclimate measurement studies revealed a reduction in the incident solar energy above the crops inside screenhouses relevant to the shading factor of each net, while air temperature and vapor pressure deficit were not modified compared to the open field conditions. However, the presence of nets improved microclimate inside screenhouses, as been indicated by the significantly reduced canopy-to-air temperature difference and canopy-to-air vapor pressure deficit. Total yield increased by 78%, 30% and 7% inside screenhouses $IP_{13\%}$, $IP_{34\%}$ and $G_{36\%}$, respectively, compared to the open field yield. Marketable yield inside screenhouses was about 90% of the total harvested yield, while in the open field was about 60%. Furthermore, quality of yield was improved inside screenhouses compared to the open field, harvesting larger fruits than those of the open field, while sunscald was almost eliminated, BER was significantly reduced and inside insect proof screenhouses defects from thrips attacks were also reduced.

Keywords: Shade net, insect proof screen, yield, quality of yield, sunscald, BER.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την περασμένη δεκαετία μεγάλο μέρος της εντατικής γεωργίας μετατοπίστηκε, στο Ισραήλ, στην Ιταλία, στη νότια Ισπανία και αλλού, εντός των διχτυοκηπίων. Καθώς η τεχνική καλλιέργειας σε

διχτυοκήπια είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία σχετικά με τις εκτάσεις που καλλιεργούνται υπό σκίαση. Παρόλα αυτά οι εκτάσεις είναι αρκετές και μόνο στο Ισραήλ καλλιεργούνται περίπου 60000 στρέμματα (M. Teitel, προσωπική επικοινωνία), ενώ

στην Ελλάδα οι καλλιεργούμενες εκτάσεις υπό σκίαση φαίνεται να ξεπερνούν τις 10000 στρέμματα (υπολογισμοί εκτάσεων από την «Πλαστικά Θράκης ΑΕ», προσωπική επικοινωνία. Η συνεχής αυξανόμενη χρήση των κατασκευών αυτών και ιδιαίτερα αυτών που καλύπτονται με εντομοστεγανά δίχτυα, προέρχεται κυρίως από την αυξανόμενη ζήτηση για «καθαρά» προϊόντα παραγόμενα με μειωμένη χρήση φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων (Castellano et al., 2008). Τα δίχτυα αποτελούν μια τεχνική καλλιέργειας φιλική προς το περιβάλλον και την υγεία των παραγωγών και των καταναλωτών καθώς μειώνουν την ανάγκη για χρήση εντομοκτόνων. Έχει βρεθεί ότι η αποδοτικότερη επένδυση για κάθε περιοχή δεν είναι απαραίτητα και η περισσότερο ακριβή ή η τεχνολογικά περισσότερο ανεπτυγμένη (Vanthoor et al., 2012). Τα δίχτυα, τα οποία σε σχέση με το θερμοκήπιο αποτελούν μια χαμηλού κόστους επένδυση, προστατεύουν αποτελεσματικά την καλλιέργεια από τα υψηλά επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αυξάνοντας σημαντικά όχι μόνο την συνολική αλλά και την εμπορεύσιμη παραγωγή, εξαλείφοντας τα ηλιακά εγκαύματα των καρπών και τα προβλήματα που προκύπτουν από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην καλλιέργεια στον ανοιχτό αγρό (Kittas et al., 2012). Παράλληλα, συμβάλλουν στην εξοικονόμηση νερού καθώς σε σχέση με την καλλιέργεια στον ανοιχτό αγρό μειώνουν την κατανάλωση νερού από την καλλιέργεια (Möller and Assouline, 2007; Katsoulas et al., 2012). Επιπλέον, τα δίχτυα δίνουν τη δυνατότητα τροποποίησης της ποιότητας της ηλιακής ακτινοβολίας και μέσω της φωτομορφογένεσης μπορεί να επηρεάσουν ευνοϊκά την ανάπτυξη και παραγωγή της καλλιέργειας (Shahak et al., 2008). Οι Kittas et al., (2009) μελέτησαν την επίδραση 3 επιπέδων σκίασης (34%, 40% & 49%) στην παραγωγή και στην ποιότητα των καρπών καλλιέργειας τομάτας στην ανατολική Ελλάδα (Μαγνησία). Η σκίαση αύξησε την συνολική και την εμπορεύσιμη παραγωγή περίπου 43% και 100%, αντίστοιχα, σε σχέση με την καλλιέργεια χωρίς σκίαση. Καλλιέργεια πιπεριάς εντός δίχτυου καλυμμένου με μαύρο δίχτυ σκίασης 30%, απέδωσε 5.9 και 9.3 kg m⁻² το 2004 και το 2005 αντίστοιχα (Möller and Assouline, 2007). Οι Romacho et al. (2006) δεν βρήκαν διαφορές στην επίδραση διάφανου και πράσινου δικτύου επί της παραγωγής καρπών υψηλής ποιοτικής κλάσης τομάτας cherry. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι είναι ανάγκη, λοιπόν, να βρεθεί ποιά είναι τα κατάλληλα δίχτυα σκίασης (χρώμα, διαπερατότητα, πορώδες) κηπευτικών καλλιεργειών σε μεσογειακές περιοχές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη ποσότητα και η βέλτιστη ποιότητα των προϊόντων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης τριών δικτύων με διαφορετικό πορώδες, συντελεστή σκίασης και χρώμα στο μικροκλίμα και στην παραγωγικότητα καλλιέργειας πιπεριάς εντός δίχτυου σε μεσογειακή περιοχή.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικές εγκαταστάσεις

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε τρία πειραματικά δίχτυα με επίπεδη οροφή, διαστάσεων 20 m (μήκος), 10 m (πλάτος) και 3.2 m (ύψος), προσανατολισμένα Β-Ν (με απόκλιση 36° από τον Βορρά), εγκατεστημένα στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο: γ.π. 39° 22', γ.μ. 22° 44', ύψος 85 m κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινοπώρου του 2012. Τρία διαφορετικά δίχτυα δοκιμάστηκαν: (α) ένα εντομοστεγανό (anti-thrip net, 50-mesh) με διάφανα νήματα και συντελεστή σκίασης 13% (*IP*_{13%}) (AntiVirusTM, Meteor Agricultural Nets Ltd, Israel), (β) ένα εντομοστεγανό (anti-thrip net, 50-mesh) με λευκά νήματα και συντελεστή σκίασης 34% (*IP*_{34%}) (BionetTM, Meteor Agricultural Nets Ltd, Israel) και (γ) ένα πράσινο δίχτυ σκίασης με συντελεστή 36% (*G*_{36%}) (Πλαστικά Θράκης ΑΕ. Ξάνθη, Ελλάδα). Επομένως, τα *IP*_{13%} και *IP*_{34%} είχαν το ίδιο πορώδες αλλά διαφορετικό συντελεστή σκίασης, ενώ τα *IP*_{34%} και *G*_{36%} έχουν παρόμοιο συντελεστή σκίασης αλλά διαφορετικό πορώδες, διότι το *G*_{36%} έχει μεγαλύτερο μέγεθος οπών από τα *IP*_{13%} και *IP*_{34%}. Οι συντελεστές σκίασης που προαναφέρθηκαν υπολογίστηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις για μήκη κύματος 350 nm - 1100 nm με τη χρήση φασματοφωτομέτρου (model LI-1800, LI-COR, Lincoln, NE, USA) εξοπλισμένου με λαμπτήρα αλογόνου 10 W και εξωτερική σφαίρα ολοκλήρωσης (model LI-1800-12S, LI-COR, Lincoln, NE, USA).

Σπορόφυτα γλυκιάς πιπεριάς (*Capsicum annuum* L., cv. *Dolmi*) μεταφυτεύθηκαν στις 8 Μαΐου του 2012, σε 5 διπλές γραμμές φύτευσης σε αποστάσεις 0.5 m x 0.5 m επί των διπλών γραμμών φύτευσης, ενώ η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών διπλών γραμμών ήταν 1.2 m. Φυτά μεταφυτεύθηκαν και καλλιεργήθηκαν και στον ανοιχτό αγρό που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας (Cont). Τα φυτά κλαδεύτηκαν σύμφωνα με το ισπανικό σύστημα, υποστηρίχθηκαν με κάθετα σχοινιά τα οποία προσδέθηκαν σε οριζόντια σύρματα που ήταν προσαρτημένα κατά μήκος του σκελετού των δικτυοκηπίων και καλλιεργήθηκαν σύμφωνα με την κοινή πρακτική. Η άρδευση της κάθε καλλιέργειας γινόταν όταν το άθροισμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ξεπερνούσε τα 21.5 MJ m⁻² και τότε εφαρμόζονταν 4.61 mm νερού με στάγδην άρδευση.

2.2 Μετρήσεις

Τα παρακάτω κλιματικά δεδομένα καταγραφόταν στο μέσον κάθε δικτυοκηπίου και στον ανοιχτό αγρό: (α) θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα με τη χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας (HOBO H8 ProRH/ Temp. Logger., Onset, USA), τοποθετημένων εντός προστατευτικών έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας κελυφών, σε ύψος 1.5 m από την επιφάνεια του εδάφους, (β) συνολική ηλιακή

ακτινοβολία με τη χρήση πυρανομέτρων (model SP-LITE Silicon Pyranometer, Campbell Scientific, Inc., U.S.A.) εγκατεστημένων σε ύψος 1.5 m από την επιφάνεια του εδάφους (πάνω από την κεντρική γραμμή φύτευσης), (γ) ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου εκτός των διχτυοκηπίων θερμοκρασία φύλλων με θερμοζεύγη Cu-Co (type T, wire diameter 0.5 mm, Omega Engineering, Manchester, U.K.) προσαρτημένα στην κάτω επιφάνεια 10 αντιπροσωπευτικών φύλλων από φυτά κάθε μεταχείρισης. Μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου και της θερμοκρασίας των φύλλων γίνονταν κάθε 30 s και η μέση τιμή τους υπολογίζονταν για κάθε 10 min και αποθηκεύονταν σε καταγραφική συσκευή (data logger system, model DL3000, Delta-T Devices, Cambridge, U.K.).

Σειρά μη καταστροφικών μετρήσεων (ύψος φυτών, αριθμός φύλλων) διεξάγονταν κάθε 15 ημέρες, σε 8 τυχαία επιλεγμένα φυτά για κάθε μεταχείριση. Κάθε ημέρα συγκομιδής καταγράφονταν το βάρος και ο αριθμός των συγκομισμένων και από το συνολικό άθροισμά τους προέκυψε η συνολική παραγωγή (kg m^{-2}). Η παραγωγή χωρίστηκε σε εμπορεύσιμη και μη εμπορεύσιμη, βάσει παρουσίας φυσιολογικών ανωμαλιών (ηλιακά εγκαύματα και ξηρή σήψη κορυφής (BER)) και βλαβών από θρίπες.

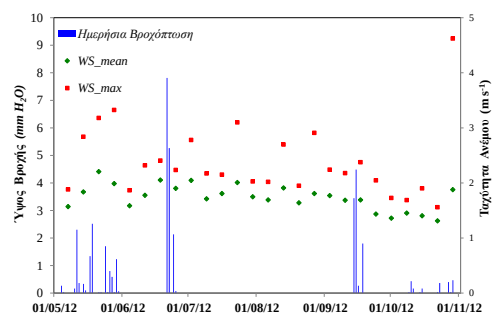
Σειρά καταστροφικών μετρήσεων διεξάγονταν κάθε 21 ημέρες, σε 4 τυχαία επιλεγμένα φυτά για κάθε μεταχείριση. Τα φυτικά όργανα (βλαστοί, φύλλα και καρποί) ζυγίζονταν για να μετρηθεί το νωπό βάρος τους και στην συνέχεια ξηραίνονταν (48 h στους 85°C) και κατόπιν μετριόταν το ξηρό βάρος τους.

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων έγινε με την χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (SPSS-14.0 for Windows standard version, 2005, SPSS BI Greece S.A.) με την μέθοδο επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (*repeated measures*), σε επίπεδο σημαντικότητας $P < 0.05$ και με τη εφαρμογή του κριτηρίου Duncan.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μικροκλίμα

Οι παρατεταμένες βροχοπτώσεις αλλά και οι ισχυροί άνεμοι κατά την διάρκεια του Μαΐου επηρέασαν αρνητικά την καλλιέργεια του ανοικτού αγρού (οπτική παρατήρηση). Η μέση ημερήσια τιμή ανά εβδομάδα της ταχύτητας του ανέμου κυμάνθηκε μεταξύ 1.3 and 2.2 m s^{-1} , ενώ η αντίστοιχη μέγιστη δεν ξεπερνούσε συνήθως τα 3.3 m s^{-1} (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1. Βροχόπτωση ανά ημέρα και ταχύτητα του ανέμου ανά εβδομάδα (μέση & μέγιστη τιμή) κατά την καλλιεργητική περίοδο 2012.

Τα διχτυοκήπια IP_{34%} and G_{36%} είχαν παρόμοιες τιμές εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Πίνακας 1). Η περατότητα των διχτυοκηπίων υπολογίστηκε από τον λόγο του μέσου ημερήσιου αθροίσματος ανά μήνα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εντός των διχτυοκηπίων προς το μέσο ημερήσιο άθροισμα ανά μήνα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον ανοικτό αγρό. Έτσι, οι περατότητες των διχτυοκηπίων ήταν 0.74, 0.62 και 0.62 για τα IP_{13%}, IP_{34%} και G_{36%} διχτυοκήπια, αντίστοιχα. Η μείωση της περατότητας στον πειραματικό αγρό σε σχέση με εκείνη που μετρήθηκε στο εργαστήριο θα μπορούσε να αποδοθεί (α) στο ότι οι εργαστηριακές μετρήσεις περιλαμβάνουν κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας από την λάμπα αλογόνου, ενώ στον αγρό η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται υπό γωνία (κλίση του ηλίου) (β) στον αγρό παρατηρείται συσσώρευση σκόνης στην επιφάνεια των διχτύων και (γ) στην επίδραση των δομικών στοιχείων του σκελετού των διχτυοκηπίων.

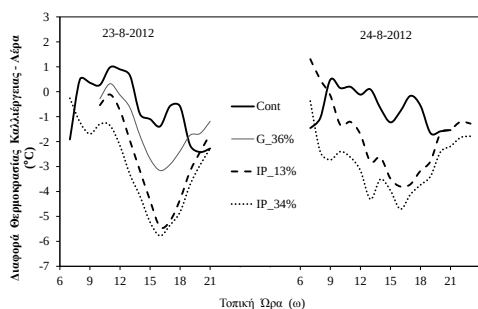
Πίνακας 1. Μέση τιμή ανά μήνα του ημερήσιου αθροίσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (R_s ; MJ m^{-2}) που προσπίπτει στην καλλιέργεια κάθε διχτυοκηπίου και σε εκείνη του ανοικτού αγρού.

	R_s (MJ m^{-2})			
	Cont	IP _{13%}	IP _{34%}	S _{36%}
Ιούλιος	24,64	17,76	15,34	15,41
Αύγουστος	22,08	16,45	13,63	13,75
Σεπτέμβριος	16,52	12,24	10,27	9,94

R_s : Ημερήσιο άθροισμα της ηλιακής ακτινοβολίας

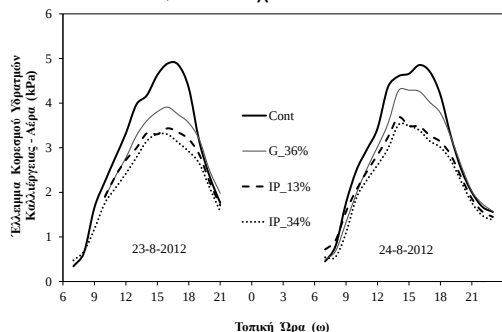
Καμία σημαντική διαφορά δεν παρατηρείται τόσο στην θερμοκρασία όσο και στο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών του αέρα. Επομένως, όποιες διαφορές στην απόδοση των φυτών ανάμεσα στις μεταχειρίσεις του πειράματος μπορούν να αποδοθούν κυρίως στις διαφορές στην προσπίπτουσα, στις καλλιέργειες, ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η διακύμανση της διαφοράς της θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα (δT_c) και στο Διάγραμμα 3 εκείνη του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών καλλιέργειας-αέρα (D_c), σε όλες τις μεταχειρίσεις του πειράματος, κατά τη διάρκεια δυο χαρακτηριστικών ημερών της πειραματικής περιόδου 2012.



Διάγραμμα 2. Εξέλιξη της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα (δT_c) στα διχτυοκήπια και στον ανοικτό αγρό, κατά τη διάρκεια δυο χαρακτηριστικών ημερών της πειραματικής περιόδου 2012.

Εντός των διχτυοκηπίων η δT_c ήταν πάντα μικρότερη της αντίστοιχης του ανοικτού αγρού. Η μέση τιμή της δT_c ήταν -0.6°C ενώ οι αντίστοιχες για τα διχτυοκήπια τα IP_{13%}, IP_{34%} και G_{36%} ήταν -2.3°C , -3.2°C και -1.5°C , αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3. Εξέλιξη του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών (D_c) καλλιέργειας-αέρα στα διχτυοκήπια και στον ανοικτό αγρό κατά τη διάρκεια δύο χαρακτηριστικών ημερών της πειραματικής περιόδου 2012.

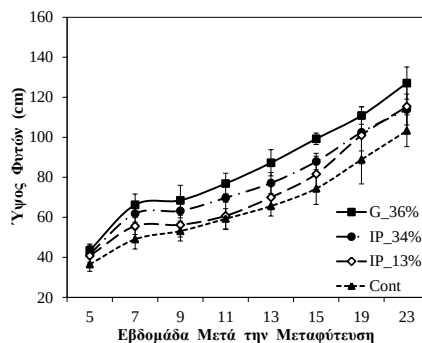
Οι τιμές του D_c στον ανοικτό αγρό είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες εντός των διχτυοκηπίων. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από τις χαμηλότερες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα που παρατηρούνται εντός των διχτυοκηπίων σε σχέση με τον ανοικτό αγρό.

3.2 Αγρονομικά χαρακτηριστικά

3.2.1 Αύξηση & Ανάπτυξη

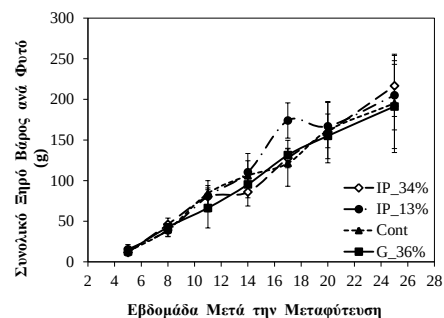
Τα φυτά εντός του διχτυοκηπίου G_{36%} είχαν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερο ύψος από εκείνα των IP_{13%}, IP_{34%}, κατά την διάρκεια της πειραματικής περιόδου, ενώ τα φυτά του ανοικτού αγρού είχαν στατιστικώς σημαντικά μικρότερο ύψος από εκείνα των διχτυοκηπίων (Διάγραμμα 4.). Το ύψος των φυτών αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή σκίασης. Συγκρίνοντας τα φυτά των διχτυοκηπίων IP_{34%} και G_{36%} θα ανέμενε κανείς ότι θα παρουσίαζαν παρόμοιο ύψος. Η παρατηρούμενη διαφορά θα μπορούσε να αποδοθεί στην ποιότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εντός των διχτυοκηπίων, λόγω διαφορετικού χρώματος των διχτύων τους. Η συνολική ξηρά ουσία προέκυψε από το άθροισμα των ξηρών βαρών των βλαστών των

φύλλων και των παρόντων, κατά την ημέρα της καταστροφικής μέτρησης, καρπών (Διάγραμμα 5.).



Διάγραμμα 4. Εξέλιξη του ύψους των φυτών εντός των διχτυοκηπίων και στον ανοικτό αγρό για την καλλιεργητική περίοδο Ιούνιος - Οκτώβριος 2012.

Η συνολική ξηρά ουσία δεν παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε όλες τις μεταχειρίσεις του πειράματος. Παρόμοιες πορείες παρουσίασαν οι εξελίξεις των ξηρών βαρών των επιμέρους οργάνων των φυτών (φύλλα, βλαστοί και καρποί), εκτός από την εξέλιξη του ξηρού βάρους των καρπών των φυτών εντός του IP_{13%}, που ήταν ιδιαίτερα αυξημένο κατά την DAT 120, το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στον αυξημένο αριθμό, σχεδόν ώριμων για συγκομιδή, καρπών που είχαν τα φυτά την συγκεκριμένη ημέρα της καταστροφικής μέτρησης.



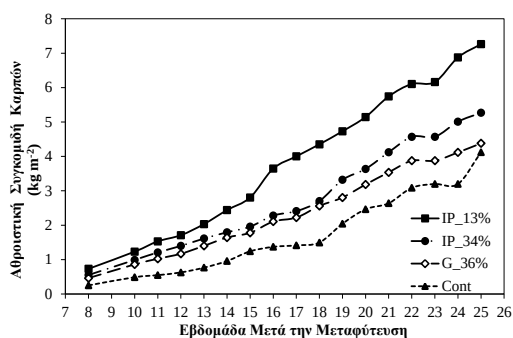
Διάγραμμα 5. Εξέλιξη της συνολικής παραχθείσας ξηράς ουσίας των φυτών εντός των διχτυοκηπίων και του ανοικτού αγρού κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου 2012.

3.3.2 Παραγωγή & Ποιότητα Καρπών

Η συνολική αθροιστική παραγωγή καρπών προέκυψε από το άθροισμα των συγκομιδών όλων των φυτών των τριών εσωτερικών διπλών γραμμών φύτευσης του πειραματικού αγρού κάθε μεταχείρισης. Οι εξωτερικές διπλές γραμμές εξαιρέθηκαν ώστε να αποκλειστεί το σφάλμα του περιθωρίου. Οι συνολική παραγωγή καρπών ήταν: 7.3, 5.3, 4.4 και 4.1 kg m^{-2} για τα φυτά των διχτυοκηπίων IP_{13%}, IP_{34%}, G_{36%} και εκείνα του ανοικτού αγρού, αντίστοιχα (Διάγραμμα 6). Οι Kittas et al. (2012) μελέτησαν την επίδραση τριών διαφορετικών επιπέδων σκίασης (34%, 40% και 49%) στην παραγωγή καλλιέργεια τομάτας στη Θεσσαλία και βρήκαν ότι η σκίαση αύξησε, σε σχέση με τον ανοικτό αγρό, την συνολική παραγωγή

κατά 43%, χωρίς όμως να παρατηρηθούν διαφορές ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα σκίασης. Η αύξηση είναι παρεμφερής με εκείνη της περίπτωσης του IP_{34%} (30%), αλλά διαφέρει από εκείνη του G_{36%} (7%), γεγονός που πιθανόν να μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά της ποιότητας της ακτινοβολίας των διχτυών των δυο πειραμάτων. Επιπλέον, φαίνεται ότι η εφαρμογή σκίασης $\approx 20\%$, (διχτυοκήπιο IP_{13%}) έχει ακόμη μεγαλύτερη θετική επίδραση επί της καλλιέργειας απ' ό,τι η σκίαση $\approx 35\%$.

Οι καρποί των φυτών εντός των διχτυοκηπίων ήταν μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με εκείνους των φυτών του μάρτυρα, δείκτης που υποδηλώνει ποιοτική υπεροχή των καρπών των φυτών υπό κάλυψη (Πίνακας 2). Από την συνολική παραγωγή αφαιρέθηκε εκείνο το ποσοστό των καρπών που παρουσίασαν ελαττώματα. Το σύνολο της παραγωγής που ήταν καθαρό από φυσιολογικές ανωμαλίες (ηλιακά εγκαύματα και BER) και από προσβολές από θρίπες αποτελεί την εμπορεύσιμη παραγωγή η οποία ήταν περίπου 90% επί της συνολικής παραγωγής για όλα τα διχτυοκήπια έναντι 60% του μάρτυρα. Ανάλογες παρατηρήσεις σχετικά με την ποιότητα των καρπών έκαναν και οι Kittas et al. (2012).



Διάγραμμα 6. Συνολική αθροιστική παραγωγή (χλωρό βάρος, kg m⁻²) εντός των διχτυοκηπίων και στον ανοικτό αγρό για την καλλιεργητική περίοδο Ιούνιος - Οκτώβριος 2012.

Πίνακας 2. Ποιότητα παραγωγής. Βάρος ανά καρπό (g) και εμπορεύσιμη παραγωγή εκφρασμένη ως ποσοστό % της συνολικής παραγωγής.

	Cont	IP _{13%}	IP _{34%}	G _{36%}
Βάρος ανά καρπό (g)	84,3	94,5	104,4	100,6
Εμπορεύσιμη Παραγωγή (%)	63	92	87	88

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δίχτυα μείωσαν τα επίπεδα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο χώρο των διχτυοκηπίων, χωρίς όμως να επέλθει μεταβολή στην θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού υδατμών του αέρα εντός των κατασκευών. Ωστόσο, η παρουσία των διχτυών επέδρασε θετικά τόσο στην διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα, όσο και στο έλλειμμα κορεσμού

υδατμών καλλιέργειας-αέρα, γεγονός που υποδεικνύει βελτιωμένο μικροκλίμα εντός των διχτυοκηπίων. Η συνολική, αλλά και η εμπορεύσιμη παραγωγή ήταν σημαντικά αυξημένες για τις καλλιέργειες εντός των διχτυοκηπίων. Επιπλέον, βελτιώθηκε σημαντικά η ποιότητα των παραγόμενων καρπών, τόσο σε σχέση με το μέγεθός τους όσο και με την απουσία φυσιολογικών ανωμαλιών και προσβολών από έντομα.

Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την AGROPLAST® για την χορηγία των εντομοσεγανών διχτυών IP_{13%} και IP_{34%} και την Plantas S.A για τη χορηγία των σποροφύτων πιπεριάς.

Βιβλιογραφία

- Vanthoor B.H.E., Stanghellini C., van Henten E.J., Visser P.H.B. 2011. A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates, Biosyst. Engin., 110(4): 363-377.
- Castellano, S., G.M. Scarascia, G. Russo, D. Briassoulis, A. Mistriotis, S. Hemming, and D. Waaijenberg. 2008. Plastic nets in agriculture: a general review of types and applications. Appl. Eng. Agric. 24:799-808
- Kittas, C., Katsoulas, N., Rigakis, N., Bartzanas, T., Kitta, E. 2012. Effects on microclimate, crop production and quality of a tomato crop grown under shade nets. J. Hortic. Sci. Biot. 87(1): 7-12
- Moller M. and Assouline S. 2007. Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. Irrig. Sci. 25:171-181.
- Katsoulas N., Rigakis N., Kitta E., and Baille A. 2012. Transpiration of a Sweet Pepper Crop Under Screenhouse Conditions. Acta Hortic. 957:91-97
- Kittas C., Rigakis N., Katsoulas N. and Bartzanas T., 2009. Influence of shading screens on microclimate, growth and productivity of tomato. Acta Hort. 807:97-102.
- Romacho I., Hita O., Soriano T., Morales M.I., Escobar I., Suarez-Rey E.M., Hernandez J. and Castilla N. (2006). The growth and yield of cherry tomatoes in net covered greenhouses. Acta Hortic. 719, 529-534.
- Shahak, Y., 2008. Photosensitive netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried in Israel. Acta Hort. 770, 161-16.

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ

Σωτήριος Δ. Καλαμάρας¹, Χρήστος Δ. Μανδρούκας¹, Παναγιώτης Γ. Κούγιας², Θωμάς Α. Κωτσόπουλος¹ και Γεράσιμος Γ. Μαρτζόπουλος¹

¹ Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124.,

² Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark

Ο τελευταίος νόμος για τις Α.Π.Ε. 3851/2010, καθώς και οι υπουργικές αποφάσεις με αριθμό Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2302/16934 και Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2301/οικ.16933 δημιούργησαν νέα δεδομένα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τη καύση του βιοαερίου σε ένα σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Σ.Η.Θ.), δείχνει πλέον να αποτελεί ελκυστική επένδυση. Επιπλέον, το υπόλειμμα, που αποτελεί τελικό προϊόν της αναερόβιας επεξεργασίας των αποβλήτων, δύναται να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό, προάγοντας την αειφορική γεωργία, τόσο σε οικονομικό, όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Στην εργασία αυτή, υπολογίστηκε το δυναμικό παραγωγής του βιοαερίου, από το σύνολο των ζωικών αποβλήτων, που παράγονται στις κτηνοτροφικές μονάδες της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας. Ερευνήθηκε, η δυνατότητα εγκατάστασης μονάδας επεξεργασίας του συνόλου των κτηνοτροφικών αποβλήτων που παράγεται στη περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου και την μετατροπή του, σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Επίσης, μελετήθηκαν τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την παραγωγή της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας της μονάδας παραγωγής βιοαερίου. Τέλος, με την παρούσα μελέτη, εξασφαλίζεται μία βιώσιμη και σύγχρονη λύση για τους κτηνοτρόφους που δραστηριοποιούνται στη περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, προωθώντας την αύξηση του ζωικού κεφαλαίου στις υφιστάμενες κτηνοτροφικές μονάδες και δίνει επιπλέον κίνητρα για νέες επενδύσεις στον κτηνοτροφικό και αγροτικό τομέα.

Λέξεις κλειδιά: ζωικά απόβλητα, αναερόβια χώνευση, βιοαέριο, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια

BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM ANIMAL WASTES IN REGIONAL UNIT OF KARDITSA

Sotirios D. Kalamaras¹, Christos D. Mandroukas¹, Panagiotis G. Kougias², Thomas A. Kotsopoulos¹ and Gerasimos G. Martzopoulos¹

¹Departure of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University Of Thessaloniki, University Campus, GR-54124, Thessaloniki, Greece

²Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Miljøvej Bld. 113, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark

skalamaras@agro.auth.gr, xristosman@windowslive.com, panak@env.dtu.dk
mkotsop@agro.auth.gr, martzopo@agro.auth.gr

The last law on RES 3851/2010 and the ministerial decisions No. Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2302/16934 and Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2301/16933 created new standards in the field of electricity production from renewable energy sources. Electric power produced by biogas combustion in a system of Combined Heat and Power (C.H.P.) seems to be an attractive investment. The residue, which is one of the final products of the anaerobic waste treatment, can be used as fertilizer, promoting sustainable agriculture in economically and in environmental terms. In this work, the biogas potential of animal wastes obtained by all farms in the regional unit of Karditsa was calculated. Moreover, the possibility of installing a biogas plant, which will utilise all livestock waste produced in the regional unit of Karditsa, in order to produce biogas and convert it to electricity and to thermal energy, was investigated. The economic benefits resulting from the electricity and thermal energy production of the biogas plant were also presented. Finally, this study ensures a sustainable and modern solution for farmers of the regional Karditsa unit, which promotes the existing farms to increase herd size and provides additional incentives for new investments in the livestock and agriculture sector.

Key words: animal wastes, anaerobic digestion, biogas potential, electric and thermal energy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα γεωργικά και ζωικά απόβλητα κατά- λαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης βιομάζας στην Ελλάδα και μπορούν με τη μορφή των πρώτων υλών, να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής

ενέργειας (Skoulou and Zabaniotou, 2007). Η συνεχής ρύπανση από την παραγωγή των ζωικών αποβλήτων κατά όλη τη διάρκεια του χρόνου, αλλά και η αυξανόμενη ζήτηση σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, αποτελούν δυο σημαντικά ζητήματα προς επίλυση. Η τεχνολογία του βιοαερίου, με κύρια

χαρακτηριστικά της, τη συνεχή επεξεργασία των αποβλήτων και τη σταθερή παραγωγή ενέργειας, μπορεί να αποτελέσει συνδυαστική λύση, για τα προαναφερθέντα ζητήματα. Η παραγωγή του βιοαερίου οφείλεται στην αναερόβια επεξεργασία των αποβλήτων. Η αναερόβια επεξεργασία, είναι μια σύνθετη διαδικασία, κατά την οποία πραγματοποιείται αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας, από αναερόβιους μικροοργανισμούς, απουσία οξυγόνου (Kotsopoulos et al, 2008). Η τεχνολογία του βιοαερίου επιλέχθηκε, διότι η αναερόβια επεξεργασία είναι μία από τις πιο κατάλληλες μεθόδους, για την επεξεργασία των αποβλήτων που περιέχουν υψηλή συγκέντρωση οργανικού άνθρακα (C).

Στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο της Θεσσαλίας, εκτρέφονται κυρίως αιγοπρόβατα, βοοειδή και χοίροι. Η εντατικής μορφής κτηνοτροφικές μονάδες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς την τεχνολογία του βιοαερίου. Στην εντατική κτηνοτροφία τα εκτρέφόμενα ζώα, παραμένουν το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο εσωτερικό των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων, καθιστώντας δυνατή και ευκολότερη την συλλογή των αποβλήτων, σε αντίθεση με την εκτατική μορφή, όπου τα ζώα τρέφονται και παραμένουν εκτός των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων για περισσότερο χρόνο. Στην περιοχή της Καρδίτσας, τα ζώα που εκτρέφονται εντατικά, είναι τα βοοειδή, οι χοίροι και ελάχιστα τα αιγοπρόβατα.

Σκοπός της εργασίας, είναι να εκτιμήσει το δυναμικό παραγωγής του βιοαερίου των ζωικών αποβλήτων που παράγονται στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, όπως και τη δυνατότητα δημιουργίας μονάδος βιοαερίου. Περαιτέρω, γίνεται αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση του πληθυσμού και το είδος του ζωικού κεφαλαίου της Καρδίτσας που μπορεί να συσχετισθεί με την τεχνολογία του βιοαερίου, καθώς επίσης υπολογίζεται και η ημερησία παραγωγή των ζωικών αποβλήτων. Επίσης, θα μελετηθούν προτάσεις για την εκμετάλλευση της ενέργειας που προκύπτει από το σύστημα Σ.Η.Θ., υπολογίζονται τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η περιεκτικότητα σε άζωτο (N), φώσφορο (P) και κάλιο (K) του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παρούσα έρευνα βασίστηκε σε δεδομένα που αφορούν τον πληθυσμό του ζωικού κεφαλαίου της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας, τις ποσότητες και τη διαθεσιμότητα των ζωικών αποβλήτων που παράγονται, την τεχνολογία αναερόβιας επεξεργασίας της βιομάζας σε βιοαέριο, τις αποδόσεις μετατροπής του βιοαερίου σε ενέργεια και την εθνική νομοθεσία περί της επεξεργασίας των ζωικών αποβλήτων και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν, για τη σύνταξη ολοκληρωμένου σχεδίου επεξεργασίας των ζωικών αποβλήτων των κτηνοτροφικών μονάδων της περιοχής, τη μετατροπή τους σε ωφέλιμη ενέργεια και την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού.

Συγκεκριμένα, αντλήθηκαν δεδομένα και έγιναν συνεντεύξεις με υπευθύνους υπηρεσιών, σχετικών με το ζωικό κεφάλαιο και την παραγωγή αποβλήτων, όπως το τμήμα Αγροτικής Στατιστικής του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και τη Διεύθυνση Γεωργίας Καρδίτσας.

Η καταμέτρηση του ζωικού κεφαλαίου, αλλά και ο αριθμός των ενεργών κτηνοτρόφων πραγματοποιήθηκε με στοιχεία που αντλήθηκαν από τους επίσημους καταλόγους της κεντρικής Κτηνιατρικής υπηρεσίας Καρδίτσας και των παραρτημάτων της, στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, για το έτος 2011. Οι κτηνοτροφικές μονάδες βοοειδών μικτής κατεύθυνσης, συνυπολογίστηκαν ως κρεατοπαραγωγικές. Ο υπολογισμός του πληθυσμού των χοίρων, πρέπει να συμπεριλαμβάνει τον αριθμό των χοιρομητέρων των κάπρων, των χοιριδίων και των παχυνόμενων χοίρων. Ο αριθμός των χοιρομητέρων και των κάπρων, αντλήθηκε από στοιχεία της Κτηνιατρικής Υπηρεσίας Καρδίτσας. Κάθε χοιρομήτρα μπορεί να παράγει σε κάθε γέννα από 8 έως 16 χοιρίδια. Ωστόσο, ο αριθμός των χοιριδίων που επιβιώνει, υπό της ελληνικές συνθήκες, είναι συνήθως 10 και έγινε παραδοχή, ότι γίνονται περίπου 2 γέννες το χρόνο και επίσης ότι, για κάθε χοιρομήτρα αντιστοιχούν 5 χοιρίδια από-γαλακτισμού (χοιρίδια) 7,5-30 κιλών και 5 παχυνόμενοι χοίροι 30-100 κιλών.

Πίνακας 1: Μέσος όρος βάρους βοοειδών και χοίρων σε κιλά, καθώς και ζωικά απόβλητα, ολικά στερεά (TS) και πτητικά στερεά (VS) σε κιλά, που παράγονται ημερησίως ανά 1.000 κιλά ζώντος βάρους.

Είδος Ζώου	¹ M.O Βάρους (kg)	² Απόβλητα (kg)	² TS (kg)	² VS (kg)
Βοοειδή				
Γαλακτ/γής				
≥ 12 μηνών	420	80.0	10.00	8.50
< 12 μηνών	180	85.0	9.14	7.77
Κρεατ/γής				
≥ 12 μηνών	520	59.1	6.78	6.04
< 12 μηνών	330	58.2	7.54	6.41
Χοίροι				
Χοιρομήτρες	200	27.2	2.50	2.13
Χοιρίδια	19	106.0	10.60	8.80
Παχυνόμενοι	65	63.4	6.34	5.40
Κάπροι	270	20.5	1.90	1.70

1: Πηγή: McDonald et al, 2011

2: Πηγή: USDA, 2009

Δεδομένα αντλήθηκαν, από τη διεθνή βιβλιογραφία, για το μέσο όρο βάρους των ζώων, τα απόβλητα που παράγουν ημερησίως και την περιεκτικότητά τους σε ολικά στερεά, πτητικά στερεά, N, P και K (Πίνακας 1 και 2). Ο υπολογισμός της ποσότητας των αποβλήτων που παράγεται ημερησίως από το συνολικό αριθμό των ζώων, για κάθε είδος, έγινε με βάση τη σχέση:

Σύνολο αποβλήτων ανά είδος ζώου ανά ημέρα

(τόνοι) = Πληθυσμός ζώων x Μέσο όρο βάρους ζώου (τόνοι) x Ποσότητα αποβλήτων όπως εκκρίνονται, ανά ζώο, ανά ημέρα (τόνοι).

Πίνακας 2: Ποσότητα αζώτου (N) φωσφόρου (P) και καλίου (K) σε κιλά, που παράγονται ημερησίως ανά 1.000 κιλά ζώντος βάρους βοοειδών και χοίρων.

Είδος Ζώου	N (kg)	P (kg)	K (kg)
Βοοειδή			
Γαλακτ/γής			
≥ 12 μηνών	0,45	0,07	0,26
< 12 μηνών	0,31	0,04	0,24
Κρεατ/γής			
≥ 12 μηνών	0,31	0,11	0,24
< 12 μηνών	0,30	0,10	0,20
Χοίροι			
Χοιρομητέρες	0,19	0,06	0,12
Χοιρίδια	0,60	0,25	0,35
Παχυνόμενοι	0,42	0,16	0,22
Κάπροι	0,15	0,05	0,10

Πηγή: USDA, 2009

Το δυναμικό παραγωγής σε μεθάνιο, υπολογίστηκε βάσει της ποσότητας σε πτητικά στερεά (VS) που περιέχονται στα ζωικά απόβλητα. Η ποσότητα του βιοαερίου υπολογίστηκε, θεωρώντας ότι η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο, ανέρχεται σε 60% (Deublein et al, 2008).

Η ηλεκτρική και η θερμική ενέργεια που παράγεται από την καύση του βιοαερίου σε ένα σύστημα Σ.Η.Θ., υπολογίστηκε με βάση, ότι η απόδοση του συστήματος σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια είναι 39,9% και 44% αντίστοιχα. Τέλος, ερευνήθηκε η καταλληλότητα των ζωικών αποβλήτων για χρήση τους, ως εδαφοβελτιωτικό, μετά την αναερόβια επεξεργασία τους. Ο υπολογισμός της περιεκτικότητας στο σύνολο των αποβλήτων που παράγεται ημερησίως από το συνολικό αριθμό ζώων, για κάθε είδος, σε N, P και K, έγινε με βάση τη σχέση:

Ποσότητα του χημικού στοιχείου στο σύνολο των αποβλήτων του είδους ζώου = Πληθυσμός ζώων x Μέσο όρο βάρους ζώου (τόνοι) x Ποσότητα του χημικού στοιχείου, όπως εκκρίνεται ανά ζώο και ανά ημέρα στα απόβλητά του (τόνοι).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ζωικό κεφάλαιο

Στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, οι περισσότεροι κτηνοτρόφοι, εφαρμόζουν την εκτατική μορφή κτηνοτροφία και ασχολούνται κυρίως, με την εκτροφή των αιγοπροβάτων. Τα βοοειδή αποτελούν το τρίτο οικόσιτο ζώο προτίμησης των κτηνοτρόφων με τα βοοειδή κρεατ/γής να αποτελούν το 88,7% του συνόλου των βοοειδών του νομού. Συγκεκριμένα, το σύνολο των βοοειδών αριθμεί 7.408 κεφάλια ενώ το σύνολο το χοιρομητέρων και κάπρων αριθμεί 2.920 κεφάλια. Η εκτροφή των χοίρων, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, πραγματοποιείται σε σταβλικές εγκατα-

στάσεις, με τις περισσότερες κτηνοτροφικές μονάδες να βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ των και να τοποθετούνται κυρίως στο βορειοδυτικό και βορειοανατολικό άκρο του νομού. Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την Κτηνιατρική Υπηρεσία Καρδίτσας, παρατηρείται στη χοιροτροφία, το μεγαλύτερο ποσοστό των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων, να είναι εντατικής μορφής, γεγονός που διευκολύνει τη συγκέντρωση και διαχείριση των αποβλήτων. Άνω του 50% του πληθυσμού των χοιρομητέρων συγκεντρώνεται σε 7 κτηνοτροφικές μονάδες, ενώ στα βοοειδή, μόλις το 14% του πληθυσμού συγκεντρώνεται σε 14 κτηνοτροφικές μονάδες με περισσότερα από 100 κεφάλια.

3.2 Ζωικά απόβλητα

Ο μεγαλύτερος όγκος των αποβλήτων που παράγονται στις σταβλικές εγκαταστάσεις, στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, οφείλεται στον πληθυσμό των βοοειδών κρεατ/γής. Ο όγκος αποβλήτων των βοοειδών κρεατ/γής είναι σχεδόν επτά φορές μεγαλύτερος από τον όγκο αποβλήτων των βοοειδών γαλ/γής και σχεδόν διπλάσιος από τον όγκο αποβλήτων των χοίρων (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Απόβλητα βοοειδών και χοίρων της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας.

Είδος ζώου	Πληθυσμός	Συνολικό βάρος ζώων tn	Απόβλητα ανά ημέρα tn
Βοοειδή			
Γαλ/γής			
≥ 12 μηνών	693	291	23,28
< 12 μηνών	141	25	2,16
Σύνολο	834	316	25,44
Κρεατ/γής			
≥ 12 μηνών	4.881	2.538	150,00
< 12 μηνών	1.693	559	32,52
Σύνολο	6.574	3.097	182,52
Χοίροι			
Χοιρομητέρες	2.775	555	15,10
Χοιρίδια	13.875	260	27,58
Παχυνόμενοι	13.875	902	57,18
Κάπροι	145	40	0,82
Σύνολο	30.670	1.757	100,67

Είναι αναγκαίο να επισημανθεί πως τα απόβλητα των βοοειδών, που προκύπτουν σε κανονικές συνθήκες στις κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, και στα συνήθη συστήματα σταβλισμού, αναμειγνύονται με υλικά όπως άχυρο, φλοιούς ρυζιού, ροκανίδια κ.α. που χρησιμοποιούνται ως στρωμή, με αποτέλεσμα ο όγκος των αποβλήτων που προκύπτει τελικά, να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που παράγεται όπως εκκρίνεται από τα βοοειδή. Επίσης, στα συνήθη συστήματα σταβλισμού των χοιροτροφικών εγκαταστάσεων, ο τύπος δαπέδου που χρησιμοποιείται είναι σχαρωτός, με αποτέλεσμα την αύξηση του τελικού όγκου των αποβλήτων, λόγω ότι

προστίθενται και οι απαραίτητες ποσότητες νερών πλύσης, για την απομάκρυνση των αποβλήτων από την κτηνοτροφική εκμετάλλευση.

3.3 Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου

Το βιοαέριο είναι ένα μίγμα αερίων που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η ενέργεια που προκύπτει από την καύση του βιοαερίου, οφείλεται στην περιεκτικότητά του σε CH_4 . Η ειδική παραγωγή μεθανίου, από τις αγελάδες γαλ/γης είναι 190 λίτρα ανά κιλό VS, για τους παχυνόμενους χοίρους και τις χοιρομητέρες 350 και 270 λίτρα αντίστοιχα (Møller et al, 2004) και τέλος για τις αγελάδες κρεατ/γης 210 λίτρα (Hashimoto et al, 1981).

Γενικότερα, τα ζωικά απόβλητα που προκύπτουν από τα οικόσιτα ζώα, περιέχουν τα σημαντικά μικρό και μακροστοιχεία για τη διαδικασία της αναερόβιας αποικοδόμησης. Οι ποσότητες CH_4 και βιοαερίου που παράγονται από την αναερόβια αποικοδόμηση των αποβλήτων βοοειδών και χοίρων της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, αφορούν δεδομένα που προκύπτουν σε εργαστηριακές συνθήκες.

Πίνακας 4: Ολικά και πτητικά στερεά επί τοις εκατό κατά βάρος, καθώς και παραγωγή μεθανίου και βιοαερίου σε κυβικά ανά ημέρα από τα κτηνοτροφικά απόβλητα της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας.

Είδος Ζώου	¹ TS %	² VS %	CH_4 (m ³ /d)	Βιοαέριο (m ³ /d)
Βοοειδή				
Γαλ/γής				
≥ 12 μηνών	12,5	85,0	470	783
< 12 μηνών	10,7	72,6	32	53
Σύνολο			502	836
Κρεατ/γης				
≥ 12 μηνών	11,6	89,1	3.255	5.425
< 12 μηνών	13,0	85,0	755	1.258
Σύνολο			4.010	6.683
Χοίροι				
Χοιρομητέρες	9,2	85,2	319,5	532,5
Χοιρίδια	10,0	83,0	801,3	1.335,5
Παχυνόμενοι	10,0	85,2	1.704,5	2.840,9
Κάπροι	9,3	89,5	23,8	39,7
Σύνολο			2.849	4.748
Σύνολο		33,292	7.361	12.267

3.4 Παραγωγή ενέργειας και ποσότητες λιπαντικών στοιχείων εδαφοβελτιωτικού

Το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου υπολογίστηκε με βάση το CH_4 και σύμφωνα με τη σχέση ότι 1m³ CH_4 παράγει 9,94 kWh (Ekinci et al, 2010). Το σύνολο της ενέργειας που εξάγεται από ένα σύστημα Σ.Η.Θ., όταν διοχετεύσουμε σ' αυτό την ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται ημερησίως, μέσω αναερόβιας επεξεργασίας από τα κτηνοτροφικά απόβλητα, ισούται με 73,2 MWh. Από τη συνολική ενέργεια που παράγεται ημερησίως, το 39,9%

αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια και είναι ίση με 29,2 MWh_{el} ενώ το 44% αντιστοιχεί σε θερμική ενέργεια που ισούται με 32,2 MWh_{th}. Η ηλεκτρική ισχύς του συστήματος Σ.Η.Θ. που μπορεί να εγκατασταθεί στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, είναι ίση με 1,22 MW_{el}. Οι απώλειες σε ενέργεια από το σύστημα ΣΗΘ, που οφείλονται σε απώλειες θερμότητας, ανέρχονται στις 11.780 kWh ανά ημέρα.

Τα ζωικά απόβλητα, έπειτα από την αναερόβια επεξεργασία, έχουν σταθεροποιηθεί σε μεγάλο βαθμό και είναι πλούσια σε λιπαντικά στοιχεία (N, P, K) (Tambone et al, 2010). Οι ποσότητες των λιπαντικών στοιχείων, που περιέχονται στα κτηνοτροφικά απόβλητα, που παράγονται στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Ποσότητες λιπαντικών στοιχείων σε κιλά, όπως αυτά εκκρίνονται ανά 1.000 κιλά ζώντος βάρους βοοειδών και χοίρων, της περιφερειακής ενότητας Καρδίτσας.

Είδος ζώου	N (kg)	P (kg)	K (kg)
Βοοειδή			
Γαλ/γής			
≥ 12 μηνών	131	20	76
< 12 μηνών	8	1	6
Σύνολο	139	21	82
Κρεατ/γης			
≥ 12 μηνών	787	279	609
< 12 μηνών	168	56	112
Σύνολο	954	335	721
Χοίροι			
Χοιρομητέρες	105	33	67
Χοιρίδια	156	65	91
Παχυνόμενοι	379	144	198
Κάπροι	6	2	4
Σύνολο	646	245	360
Σύνολο	1.905	644	1.280

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Έχει βρεθεί, ότι όταν η C/N κυμαίνεται μεταξύ 25 και 32 έχει θετική επίδραση στην παραγωγή CH_4 (Hamzawi et al, 1998). Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των κτηνοτροφικών αποβλήτων σε $\text{NH}_3\text{-N}$, συνιστάται η ανάμιξη των αποβλήτων των χοίρων και των βοοειδών, όπου αυτό είναι εφικτό, με απόβλητα πλούσια σε οργανικό άνθρακα, για σταθερότητα της αναερόβιας επεξεργασίας και αύξηση της παραγωγής μεθανίου.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την καύση του βιοαερίου, που προέρχεται από την αναερόβια αποικοδόμηση αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων, σε σύστημα Σ.Η.Θ., τιμολογείται με 220€/MWh (N3851/2010), όταν η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς είναι μικρότερη των 3 MW, και η σύμβαση έχει χρονικό ορίζοντα τα 20 έτη με δυνατότητα ανανέωσης, ενώ σε περίπτωση που δεν χρησι-

μπορείται δημόσια επιχορήγηση για την επένδυση, η τιμή αυτή αυξάνεται κατά 15%. Τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, της μονάδος βιοαερίου στην περιοχή της Καρδίτσας, χωρίς επιδότηση από το Ελληνικό κράτος, θα είναι σύμφωνα με τα παραπάνω, ίση με 2.437.395 € και αποτελεί μια ελκυστική επένδυση με πολλά περιβαλλοντικά οφέλη.

Η θερμική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ΣΗΘ, δύναται να διοχετευθεί σε υφιστάμενες επιχειρήσεις, εξοικονομώντας σημαντικούς πόρους, αλλά και να αποτελέσει γενεσιουργό δύναμη για νέες επενδύσεις. Η τεχνολογία της τηλεθέρμανσης, δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς της θερμότητας από τη μονάδα βιοαερίου σε εγκαταστάσεις που έχουν μεγάλες ανάγκες σε θερμική ενέργεια και βρίσκονται στην περιφέρεια Καρδίτσας, όπως εκκοκκιστήρια βάμβακος, σφαγεία, βιομηχανίες τροφίμων, ξηραντήρια καπνού κ.α. Επιπλέον, η δημιουργία θερμοκηπίων πλησίον της μονάδος βιοαερίου, θα αποτελεί πλέον μια ελκυστική επένδυση. Το υψηλότερο κόστος αυτών των εγκαταστάσεων, αποτελεί η θέρμανσή τους και το κόστος αυτό έχει ανοδική τάση, λόγω του συνεχώς αυξανόμενου κόστους των ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς, η χρήση της περίσσειας θερμικής ενέργειας της μονάδος βιοαερίου, μπορεί να μειώσει σημαντικά τα λειτουργικά κόστη του θερμοκηπίου.

Η χρήση του υγρού/στερεού υπολείμματος, μπορεί να αποτελέσει άριστο εδαφοβελτιωτικό αυξάνοντας την παραγωγή των καλλιεργειών, όπου εφαρμόζεται. Επίσης, η εμπορευματοποίηση του υπολείμματος με την ξήρανση του υγρού κλάσματος και τον ενσάκισμό του στερεού υπολείμματος, μπορεί να αποτελέσει ένα επιπλέον έσοδο, για τη μονάδα βιοαερίου.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ποσότητες των ζωικών αποβλήτων, αλλά και η ευκολία συλλογής τους, λόγω του μεγάλου αριθμού ζώων στις κτηνοτροφικές μονάδες εντατικής μορφής, καθιστούν δυνατή τη δημιουργία, στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσας, μονάδος βιοαερίου με πολλαπλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ωστόσο, το κόστος εγκατάστασης των μονάδων βιοαερίου είναι αρκετά υψηλό και είναι απαραίτητη, η δημιουργία επενδυτικών κινήτρων, ώστε να υπάρξει υλοποίηση των επενδυτικών σχεδίων που αφορούν το βιοαέριο. Η εφαρμογή φοροαπαλλακτικών μέτρων, θα αυξήσει τα ετήσια έσοδα, μειώνοντας το χρόνο απόσβεσης του υψηλού αρχικού κεφαλαίου επένδυσης. Παράλληλα στη νομοθεσία, είναι αναγκαία η διευκόλυνση λήψης των απαραίτητων αδειών, χωρίς ωστόσο να μειώνεται η επιβεβλημένη νομική ασφάλεια.

ΓΝΩΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

This research paper has been conducted in the context of the GREEN-AgriChains project that is

funded from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7-REGPOT-2012-2013-1) under Grant Agreement No. 316167. All the above reflect only the authors' views; the European Union is not liable for any use that may be made of the information contained herein.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περιοδικά

- Ekinci, K., Kulcu, R., Kaya, D., Yaldiz, O., Ertekin, C., Ozturk, H. 2010. The prospective of potential biogas plants that can utilize animal manure in Turkey. *Energy, Exploration & Exploitation*, 28(3), 187-206.
- Hamzawi, N., Kennedy, K.J., McLean, D.D. 1998. Technical Feasibility of Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Municipal Solid Waste. *Environmental Technology*, 19(10), 993-1003.
- Hashimoto, A.G., Varel, V.H., Chen, Y.R. 1981. Ultimate methane yield from beef cattle manure: Effect of temperature, ration constituents, antibiotics and manure age. *Agricultural Wastes*, 3(4), 241-256.
- Kotsopoulos, T.A., Karamanlis, X., Dots, D., Martzopoulos, G.G. 2008. The impact of different natural zeolite concentrations on the methane production in thermophilic anaerobic digestion of pig waste. *Biosystems Engineering*, 99(1), 105-111.
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485-495.
- Skoulou, V., Zabaniotou, A. 2007. Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1698-1719.
- Tambone, F., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., Adani, F. 2010. Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*, 81(5), 577-583.
- United States Department of Agriculture, 2009. eDirectives Part 651-Agricultural Waste Management Field Handbook. National Resources Conservation Service, 4:8-13.

Κεφάλαια βιβλίων

- Deublein, D., Steinhauser, A., 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 49-52.
- McDonald, P., Edwards, R.A., Greenhalgh, J.F.D., Morgan, C.A., Sinclair, L.A., Wilkinson, R.G., 2011. Animal Nutrition. 7th Edition, Prentice Hall, pp. 345-369.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΧΑΛΑΖΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μενέλαος Θεοχάρης

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Εγγειοβελτιωτικών Έργων, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Κωστακιοί Άρτας, Τ.Κ. 47100 , e-mail: theoxar@teiup.gr.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης του χαλαζιού ως περιβαλλοντικού κινδύνου, είναι η προστασία των καλλιεργειών με την εγκατάσταση αντιχαλαζικών δικτύων. Τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίησή τους έχει πάρει μεγάλη ανάπτυξη, τόσο παγκόσμια όσο και στη χώρα μας. Κάθε εγκατάσταση αντιχαλαζικών δικτύων προϋποθέτει την ύπαρξη βασικής υποστήλωσης η οποία περιλαμβάνει τους στύλους και τα σύρματα στα οποία πρόκειται να αναρριχηθούν και να προσδεθούν τα φυτά. Μέχρι το 2012 δεν υπήρχαν στην Ελλάδα τεχνικές προδιαγραφές για την κατασκευή των στύλων της βασικής υποστήλωσης. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατόν να δημιουργηθούν εγχώριες βιομηχανίες κατασκευής τους και οι στύλοι ήταν είτε εισαγόμενοι είτε κατασκευαζόταν με ευθύνη των καλλιεργητών. Το 2012 ο ΕΛ.Γ.Α. με τη με αριθμ. 1/12-1-2012 απόφαση του Δ.Σ. του, ενέκρινε τη συγκρότηση ομάδας εργασίας για τη σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών για τα συστήματα αντιχαλαζικής και αντιβροχικής προστασίας των καλλιεργειών. Η απόφαση αυτή εγκρίθηκε με τη με αριθμ. 4432/4-4-2012 (ΦΕΚ Υ.Ο. Δ. Δ. 198/17-4-2012) απόφαση του Προέδρου του ΕΛ.Γ.Α.. Στα πλαίσια των εργασιών της ομάδας εργασίας συντάχθηκε πρότυπη τεχνική μελέτη στην οποία πλην των άλλων περιλαμβάνεται και η στατική επίλυση των στύλων όταν είναι γνωστές οι δράσεις που ασκούνται σε αυτούς. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται ο αναλυτικός συστηματικός στατικός υπολογισμός των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας. Τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την επίλυση θα χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση των στύλων.

Λέξεις κλειδιά: χαλάζι, προστασία, στατικός υπολογισμός, φόρτιση, στύλος, ΕΛ.Γ.Α.

INTEGRATED STRUCTURAL DESIGN METHODOLOGY FOR THE COLUMNS OF THE ANTI-HAIL SYSTEMS IN GREECE

Menelaos Theocharis

Laboratory of Agricultural Constructions and land-improvement works, Department of Crop Production ,Technical Educational Institution of Epirus, 47100 Arta , Greece , e-mail: theoxar@teiup.gr.

The most effective way of protecting crops against hail as an environmental danger, is to cover plantations with anti-hail nets. This method of protection has expanded greatly recently both worldwide and in our country as well. For each structure of hail-nets, a basic supporting construction is required which includes the columns and the wires on which the plants have to climb and be supported. Until 2012 there were no technical specifications for that basic supporting construction in Greece. For this reason it was not possible for any domestic construction industries to create them, so the columns were either imported or constructed by farmers themselves. In 2012 the Hellenic Organization of Agricultural Insurances (EL.G.A.) established a working group for the specification of all the appropriate technical details for anti hail protection of crops using anti-hail nets. That working group produced a structural calculation study in which, except of others, the static calculation of the columns is included as long as the actions imposed on them are known. In this paper the systematic and analytical static calculation of the anti-hail systems columns is presented. The static actions which are produced will be subsequently used for the dimensioning of the columns.

Key words: hail, protection, anti-hail net, action, column, tree crop, EL.G.A.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έλλειψη αναλυτικών τεχνικών προδιαγραφών για την κατασκευή των στύλων υποστήριξης των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας είχε ως αποτέλεσμα την αδυναμία δημιουργίας σχετικών εγχώριων κατασκευαστικών βιομηχανιών ή βιοτεχνιών. Οι στύλοι κατασκευάζονταν από τους καλλιεργητές με εμπειρικούς τρόπους ή εισάγονταν από το εξωτερικό. Και στις δύο περιπτώσεις δεν ήταν δυνατός ο έλεγχος της αντοχής τους και ήταν αμφίβολη η στερεότητα της κατασκευής. Το πρόβλημα οξύνθηκε όταν συνέβησαν κάποιες αστοχίες σε εγκαταστάσεις αντιχαλαζικής προστασίας. Για το λόγο αυτό ο ΕΛ.Γ.Α. ανέλαβε το 2012 την πρωτοβουλία για τη σύνταξη εθνικών προδιαγραφών

οι οποίες να βασίζονται στους ευρωκώδικες 1, 2, 3, 5. Στα πλαίσια των εργασιών της ομάδας εργασίας, που συγκροτήθηκε για το σκοπό αυτό, συντάχθηκε πρότυπη τεχνική μελέτη στην οποία πλην των άλλων περιλαμβάνεται και η στατική επίλυση των στύλων όταν είναι γνωστές οι δράσεις που ασκούνται σε αυτούς. Ο υπολογισμός των φορτίσεων των στύλων, που αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία του σχεδιασμού, έγινε σε προηγούμενη μελέτη μας. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μία συστηματική αναλυτική μεθοδολογία για το στατικό υπολογισμό των στύλων. Τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την επίλυση θα χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση των στύλων.

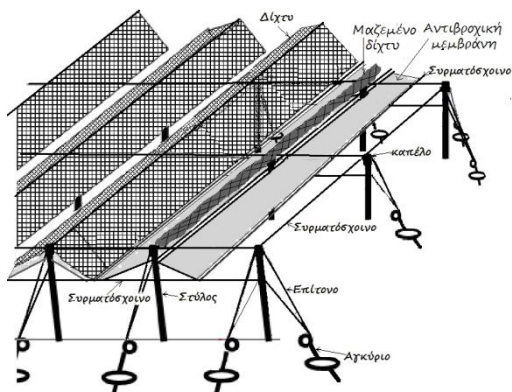
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Η υποστήλωση της εγκατάστασης

Η υποστήλωση κάθε εγκατάστασης διχτυών αντιχαλαζικής προστασίας, περιλαμβάνει τους στύλους και τα σύρματα στα οποία πρόκειται να αναρριχηθούν και να προσδεθούν τα φυτά. Η υποστήλωση πρέπει να είναι ανεξάρτητη και να μην εμποδίζεται από κάθε άλλη κατασκευή που τυχόν θα υπάρχει μέσα στο χώρο προστασίας.

Οι αποστάσεις των στύλων επί της γραμμής, L , και οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών, C , καθορίζονται από το είδος της καλλιέργειας. Για τις δενδρώδεις καλλιέργειες είναι $L / C = 10,00 / 4,00$ m.

Οι στύλοι μπορεί να είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα (σιδηροπαγές ή προεντεταμένο) ή ξύλινοι ή μεταλλικοί. Πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένοι, οι κορυφές τους να βρίσκονται σε οριζόντιο επίπεδο και να εξασφαλίζεται η στερεή έδρασή τους στο έδαφος. Το άνω άκρο τους πρέπει να καλύπτεται με κατάλληλο ειδικό πλαστικό κάλυμμα, το "καπέλο", το οποίο στερεώνει σε αυτούς τους τένοντες σύνδεσης. Στο σχήμα 1 δίνεται η ονοματολογία των εξαρτημάτων μιας εγκατάστασης αντιχαλαζικών διχτυών (ΕΛ.Γ.Α., 2012).



Σχήμα 1. Ονοματολογία των εξαρτημάτων μιας τυπικής εγκατάστασης αντιχαλαζικών διχτυών.

Υπάρχουν δύο ειδών γραμμές στύλων, οι μεσαίες και οι ακραίες. Σε κάθε μία από αυτές υπάρχουν πάλι δύο ειδών στύλοι, οι ακραίοι και οι μεσαίοι. Κάθε μία από τις τέσσερες κατηγορίες στύλων έχει διαφορετικό τρόπο κατασκευής και υφίσταται διαφορετική καταπόνηση.

Ειδικότερα : α) Στις μεσαίες γραμμές: Οι ακραίοι στύλοι κατασκευάζονται κεκλιμένοι κατά την κατεύθυνση της γραμμής με γωνία ω , ενώ οι μεσαίοι είναι κατακόρυφοι, σχήμα 3. Όλοι οι στύλοι συνδέονται με συρματόσχοινο (τένοντα) στην κεφαλή τους το οποίο, αφού προενταθεί, αγκυρώνεται έξω από τα δύο άκρα της γραμμής στο έδαφος. Η αγκύρωση των ακραίων στύλων ενισχύεται με ένα ακόμη συρματόσχοινο, το οποίο προσδένεται σε απόσταση $\lambda = 0,23C$ χαμηλότερα από την κεφαλή του στύλου, για την αντιμετώπιση του λυγισμού, σχήμα 3. β) Στις δύο ακραίες γραμμές οι μεσαίοι στύλοι κατασκευάζονται κεκλιμένοι κάθετα προς τη διεύθυνση της γραμμής με γωνία ω' , σχήμα 7. Κάθετα στις γραμμές υπάρχει συρματόσχοινο

σύνδεσης για να παραλαμβάνονται οι οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται στις κεφαλές των στύλων κάθετα στις γραμμές φύτευσης. γ) Σε κάθε μία από τις τέσσερες γωνίες, σχήμα 1, τοποθετούνται δύο στύλοι με δύο ανεξάρτητες αγκυρώσεις κεκλιμένοι, ο μὲν ένας με γωνία ω κατά τον άξονα των γραμμών φύτευσης ο δε άλλος με γωνία ω' κάθετα στις γραμμές φύτευσης.

Οι φορτίσεις, που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των στύλων της αντιχαλαζικής προστασίας, (ΕΛ.Γ.Α., 2012), είναι η ανεμοφόρτιση (Θεοχάρης, Μ., 2000., 2012, Μ. Θεοχάρης κ. α., 2011) και η προένταση των τενόντων.

2.2. Στατική επίλυση

2.2.1. Μεσαία Γραμμή

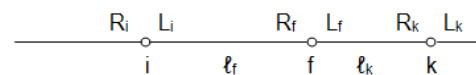
2.2.1.1. Ακραίοι στύλοι

2.2.1.1.1. Διεύθυνση x-x (άξονας της γραμμής)

Ο στύλος ΒΓΑ, σχήμα 3, ως φορέας είναι μονοπρόεχουσα μονόπακτη δοκός με πάκτωση στο Β και στήριξη στο Γ μέσω της αντηρίδας ΓΔ. Είναι μία φορά υπερστατικός. Η επίλυσή του μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως: α) η μέθοδος Cross και η μέθοδος Κανί, οι οποίες είναι μέθοδοι παραμορφώσεων (Beton Kalender, 1984, τόμος 2, § 8, σελ. 315 έως 339), β) η μέθοδος του Castigliano η οποία ανήκει στις λεγόμενες ενεργειακές μεθόδους και γ) η μέθοδος του Clapeyron ή μέθοδος των τριών ροπών με την οποία επιλύονται συνεχείς υπερστατικές δοκοί. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται να εφαρμοστεί η μέθοδος του Clapeyron ή εξίσωση των τριών ροπών, (Beton Kalender, 1984, τόμος 2, § 10, σελ. 355 έως 388). Η εξίσωση Clapeyron για μία συνεχή δοκό με σταθερή διατομή σε όλο το μήκος της, σχήμα 2, στην τυχούσα στήριξη, f, έχει τη μορφή:

$$\ell_f M_i + 2(\ell_f + \ell_k) M_k + \ell_k M_k + \ell_f R_f + \ell_k L_f = 0 \quad (1)$$

όπου R_f είναι ο δεξιός φορτικός συντελεστής του ανοίγματος if και L_f είναι ο αριστερός φορτικός συντελεστής του ανοίγματος fk, σχήμα 2. Οι φορτικοί συντελεστές προκύπτουν από τον πίνακα 2.6 της § 2.6, σελ. 222 έως 227, του τόμου Β του Beton Kalender, 1984.



Σχήμα 2. Συμβολισμοί της εξίσωσης Clapeyron

Η εξίσωση Clapeyron στην πάκτωση Β του σχήματος 3 είναι:

$$2 \cdot M_B \cdot \ell_{BF} + M_F \cdot \ell_{BF} = -\ell_{BF} \cdot R_B - \ell_{BF} \cdot L_B \quad (2)$$

Οι φορτικοί συντελεστές R_B και L_B καθώς και η ροπή M_F δίδονται από τις σχέσεις:

$$R_B = 0 \quad (3)$$

$$L_B = \frac{-g \cdot \sigma_{\text{συνω}} \cdot \ell_{BF}^2}{4} \quad (4)$$

$$M_{\Gamma} = -Q_{A,T+w} \cdot \ell_{A\Gamma} + g \cdot \sigma_{UV\omega} \cdot \frac{\ell_{A\Gamma}^2}{2} \quad (5)$$

Από την ισορροπία των αξονικών δυνάμεων προκύπτει:

$$H_B = N_{A,T+W} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} + g \cdot \eta \mu \omega \cdot \ell_{AB} = N_{A,T+W} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} + g \cdot \eta \mu \omega \cdot \frac{h}{\eta \mu \omega} = N_{A,T+W} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} + g \cdot h \quad (23)$$

οπότε και:

$$H_{\Gamma A} = N_{A,T+W} + g \cdot \eta \mu \omega \cdot \frac{\lambda}{\eta \mu \omega} = N_{A,T+W} + g \cdot \lambda \quad (24)$$

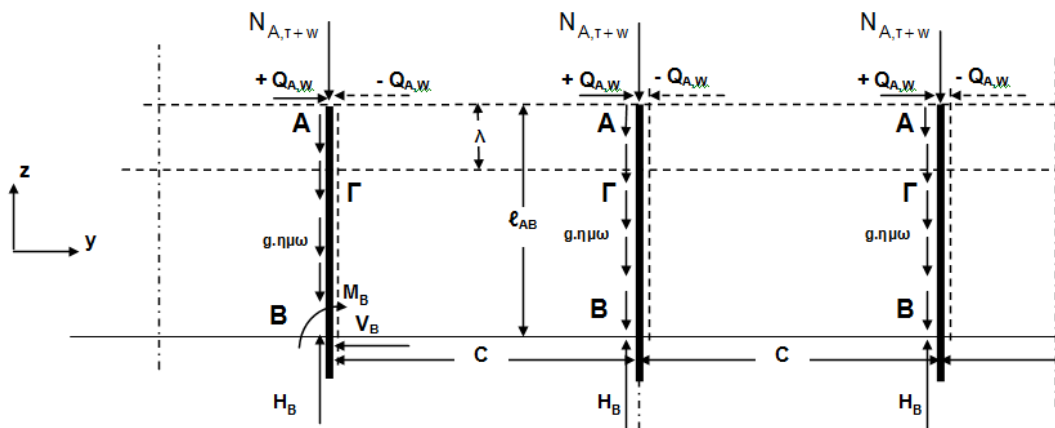
$$H_{\Gamma B} = N_{A,T+W} + H_{\Gamma A} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} \quad (25)$$

$$H_A = N_{A,T+W} \quad (26)$$

2.2.1.1.2. Διεύθυνση y-y (κάθετα στις γραμμές)

Κατά τη διεύθυνση y-y, σχήμα 5, ο στύλος ΒΓΑ μπορεί να θεωρηθεί πρόβολος με πάκτωση στο Β, επειδή θεωρήθηκε ελαστική στήριξη στον τένοντα τον κάθετο στη γραμμή φύτευσης.

Άρα:



Σχήμα 5. Φόρτιση των ακραίων στύλων των μεσαίων γραμμών κατά y-y

2.2.1.2. Μεσαίοι στύλοι

2.2.1.2.1. Διεύθυνση x-x (άξονας της γραμμής)

Οι μεσαίοι στύλοι της μεσαίας γραμμής κατά τη διεύθυνση x-x φορτίζονται μόνο με αξονική θλιπτική δύναμη $N_{A,T+W}$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Οι στύλοι αυτοί, επομένως, καταπονούνται σε κεντρική θλίψη και λυγισμό. Για τα H_A και H_B ισχύουν οι σχέσεις (31) και (32).

2.2.1.2.2. Διεύθυνση y-y (κάθετα στις γραμμές)

Όπως και στην περίπτωση των ακραίων στύλων της μεσαίας γραμμής, κατά τη διεύθυνση y-y ο στύλος ΒΑ μπορεί να θεωρηθεί πρόβολος με πάκτωση στο Β επειδή θεωρήθηκε ελαστική στήριξη στον τένοντα τον κάθετο στη γραμμή φύτευσης. Φορτίζονται στο Α με αξονική θλιπτική δύναμη $N_{A,T+W}$ και με τέμνουσα δύναμη $\pm Q_{A,W}$.

Άρα:

$$M_B = -Q_{A,W} \ell_{AB} \quad (33)$$

$$Q_{BA} = + \frac{M_a - M_B}{\ell_{AB}} = - \frac{M_B}{h} \quad (34)$$

$$V_B = +Q_{BA} \quad (35)$$

Φορτίζονται στο Α με αξονική θλιπτική δύναμη $N_{A,T+W}$ και με τέμνουσα δύναμη $\pm Q_{A,W}$.

Άρα:

$$M_B = -Q_{A,W} \ell_{AB} \quad (27)$$

όπου:

$$\ell_{AB} = \frac{h}{\eta \mu \omega} \quad (28)$$

Επομένως:

$$Q_{BA} = + \frac{M_a - M_B}{\ell_{AB}} = - \frac{M_B}{\ell_{AB}} \quad (29)$$

$$V_B = +Q_{BA} \quad (30)$$

$$H_B = N_{A,T+W} + g \cdot \eta \mu \omega \cdot \ell_{AB} = N_{A,T+W} + g \cdot \eta \mu \omega \cdot \frac{h}{\eta \mu \omega} = N_{A,T+W} + g \cdot h \quad (31)$$

$$H_A = N_{A,T+W} \quad (32)$$

$$H_B = N_{A,T+W} + g \cdot h \quad (36)$$

$$H_A = N_{A,T+W} \quad (37)$$

$$\text{όπου: } \ell_{AB} = h \quad (38)$$

2.2.2. Ακραία Γραμμή

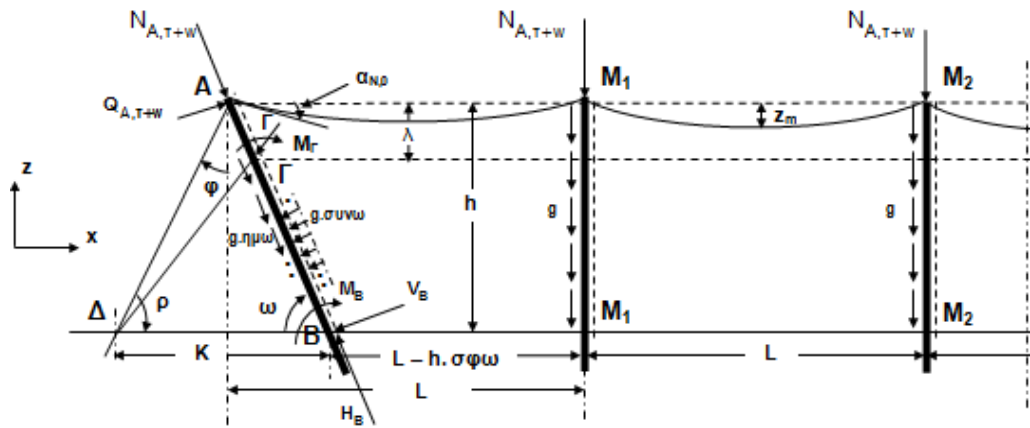
2.2.2.1. Μεσαίοι στύλοι

2.2.2.1.1. Διεύθυνση x-x (άξονας της γραμμής)

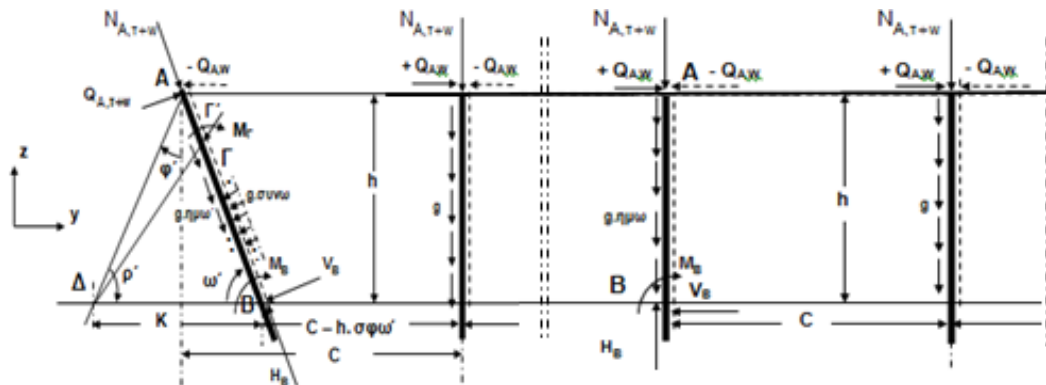
Οι μεσαίοι στύλοι $M_1 - M_1$, $M_2 - M_2$... κατά τη διεύθυνση x-x, σχήμα 6, φορτίζονται μόνο με αξονική θλιπτική δύναμη $N_{A,T+W}$ όπως ακριβώς και οι μεσαίοι στύλοι της μεσαίας γραμμής. Οι στύλοι αυτοί επομένως καταπονούνται σε κεντρική θλίψη και λυγισμό.

2.2.2.1.2. Διεύθυνση y-y (κάθετα στις γραμμές)

Ο στύλος ΒΓΑ, σχήμα 7, ως φορέας είναι πακτωμένος στο Β και στηρίζεται στο Γ μέσω της αντηρίδας ΓΔ. Είναι κατασκευή παρόμοια με τον ακραίο στύλο της μεσαίας γραμμής, δηλαδή είναι μία φορά υπερστατικός και η επίλυσή του γίνεται με τη μέθοδο του Clapeyron.



Σχήμα 6. Φόρτιση στύλων των ακραίων γραμμών κατά x-x



Σχήμα 7. Φόρτιση στύλων των ακραίων γραμμών κατά y-y

Προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$M_{\Gamma} = -Q_{A,T+W} \cdot \ell_{A\Gamma} + g \cdot \sin \omega' \cdot \frac{\ell_{A\Gamma}^2}{2} \quad (39)$$

όπου:

$$\ell_{A\Gamma} = \frac{\lambda}{\eta \mu \omega'} = \frac{0,23 \cdot C}{\eta \mu \omega'} \quad (40)$$

$$M_B = -\frac{M_{\Gamma}}{2} + \frac{g \cdot \sin \omega' \cdot \ell_{B\Gamma}^2}{8} \quad (41)$$

$$\text{όπου } \ell_{B\Gamma} = \frac{h - \lambda}{\eta \mu \omega'} \quad (42)$$

$$Q_{B\Gamma} = + \frac{-g \cdot \sin \omega' \cdot \ell_{B\Gamma}}{2} + \frac{M_{\Gamma} - M_B}{\ell_{B\Gamma}} \quad (43)$$

$$Q_{\Gamma B} = - \frac{-g \cdot \sin \omega' \cdot \ell_{B\Gamma}}{2} + \frac{M_{\Gamma} - M_B}{\ell_{B\Gamma}} \quad (44)$$

οπότε:

$$\Gamma = \frac{V_{\Gamma}}{\eta \mu \hat{\Gamma}} \quad (45)$$

όπου:

$$\hat{\Gamma} = \text{τοξημ} \frac{K \cdot \eta \mu \omega'}{(\ell_{B\Gamma}^2 + K^2 - 2 \cdot \ell_{B\Gamma} \cdot K \cdot \sin \omega')^{0,5}} \quad (46)$$

$$M_{(x)} = M_{0(x)} + M_B \cdot \left(1 - \frac{x}{\ell_{B\Gamma}}\right) + M_{\Gamma} \cdot \frac{x}{\ell_{B\Gamma}} \quad (47)$$

$$H_B = N_{A,T+W} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} + g \cdot h \quad (48)$$

$$H_{\Gamma A} = N_{A,T+W} + g \cdot \eta \mu \omega' \cdot \frac{\lambda}{\eta \mu \omega'} = N_{A,T+W} + g \cdot \lambda \quad (49)$$

$$H_{\Gamma B} = N_{A,T+W} + H_{\Gamma A} + \Gamma \cdot \sin \hat{\Gamma} \quad (50)$$

2.2.2.2. Ακραίοι στύλοι

Οι ακραίοι στύλοι της ακραίας γραμμής κατά μεν τη διεύθυνση x-x είναι ακριβώς ίδιοι με τους ακραίους στύλους των μεσαίων γραμμών κατά δε τη διεύθυνση y-y, σχήμα 7, είναι ακριβώς ίδιοι με τους μεσαίους στύλους των ακραίων γραμμών και φορτίζονται ακριβώς με τα ίδια φορτία.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΙΣ ΔΕΝΔΡΩΔΕΙΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

Θα γίνει εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφηκε για την περίπτωση προστασίας δενδρωδών καλλιέργειών στην ενδοχώρα σε εδάφη επικλινή με κλίσεις $\Phi < 5\%$ για στύλους τετραγωνικής διατομής $b/h=9,5/9,5$ cm. Οι φορτίσεις που επιβάλλονται είναι οι προτεινόμενες από την ομάδα εργασίας του ΕΛ.Γ.Α. (Μ. Θεοχάρης, 2012, ΕΛ.Γ.Α., 2012). Οι σχέσεις υπολογισμού των εντατικών μεγεθών έχουν επιλυθεί με τη δημιουργία ενός υπολογιστικού φύλλου Excel και τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στον επόμενο πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τα εντατικά μεγέθη των στύλων για δενδρώδεις καλλιέργειες στην ενδοχώρα $b/h=9,5/9,5$ cm.

Μέγεθος	Μεσαίες γραμμές				Ακραίες γραμμές					
	Ακραίοι στύλοι		Μεσαίοι στύλοι		Ακραίοι στύλοι x-x		Ακραίοι στύλοι y-y		Μεσαίοι στύλοι	
	x-x	y-y	x-x	y-y	x-x	y-y	x-x	y-y	x-x	y-y
M_r [Nm]	-2297,13				-2297,13			- 863,42		- 863,42
M_B [Nm]	1227,73	- 516,95		-7714,50	1227,73	-566,30		510,87		510,87
Q_{BF} [N]	- 927,24	$Q_{BA}=$ - 101,82		$Q_{BA}=$ -1542,90	-927,24	$Q_{BA}=$ -111,54		- 408,15		- 408,15
Q_{FB} [N]	- 774,38				-774,38			- 255,29		- 255,29
Q_{rA} [N]	2441,71				2441,71			907,01		907,01
Q_{rB} [N]	2476,18				2476,18			941,48		941,48
V_B [N]	- 927,24	- 101,82		-1542,90	-927,24	-111,54		- 408,15		- 408,15
V_r [N]	3216,09				3216,09			2585,71		2585,71
Γ [N]	7154,67				7154,67			13815,33		13815,33
H_B [N]	18740,99	12349,90	11505,58	11505,58	18740,99	12349,90	11505,58	10638,64	11505,58	10638,64
H_{rA} [N]	11482,96				11482,96			12948,39		12948,39
H_{rB} [N]	17874,05				17874,05			10638,64		10638,64
H_A [N]	11482,96	11287,47	10443,15	10443,15	11482,96	11287,47	10443,15	- 863,42	10443,15	- 863,42

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αναπτύχθηκε ένας ολοκληρωμένος τρόπος στατικού υπολογισμού των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής προστασίας στην Ελλάδα.

Οι σχέσεις υπολογισμού των εντατικών μεγεθών, που προέκυψαν από την επίλυση, είναι γενικές και μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές με οποιαδήποτε γεωμετρία, σε οποιαδήποτε περιοχή, και για οποιαδήποτε καλλιέργεια, αρκεί να επιλεγούν κάθε φορά οι τιμές των γεωμετρικών δεδομένων και των δράσεων που επιβάλλονται στις κεφαλές των στύλων από την προέκταση των τενόντων και την ανεμοφόρτιση των διχτυών. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν για στύλους από οποιοδήποτε υλικό ήτοι σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο.

Η επίλυση των σχέσεων με τη δημιουργία φύλλων Excel δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της ως υπορουτίνα στο συνολικό πρόγραμμα της μελέτης διαστασιολόγησης των στύλων. (Θεοχάρης, Μ., 2012)

Οι τιμές του πίνακα 2 θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τη διαστασιολόγηση των στύλων για εγκαταστάσεις προστασίας δενδρωδών καλλιέργειών στην ενδοχώρα. Η διαστασιολόγηση θα γίνει αναλόγως του υλικού των στύλων σύμφωνα: α) Με τον ευρωκώδικα 2, EC2, για στύλους οπλισμένου σκυροδέματος, β) Με τον EC3, για χαλύβδινους στύλους και γ) Με τον EC5, για ξυλινούς στύλους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κανονισμοί

Beton Kalender, 1984. Τόμος 2, Κεφάλαιο Β, Μετάφραση Δημ. Πέντζα, Εκδότης, Μ. Γκιούρδας.

EN 1990:2002. Eurocode: Basis of Structural Design.

EN 1991:2005. Eurocode 1: Actions on structures.

EN 1992:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures.

EN 1993:2003. Eurocode 3: Design of steel structures.

prEN 1995:2002. Eurocode 5: Design of timber structures.

ΕΛ.Γ.Α., 2012. Προδιαγραφές εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής και αντιβροχικής προστασίας καρποφόρων δένδρων και θάμνων, σελ. 9, Αθήνα.

Μονογραφίες

Θεοχάρης, Μ., 2000. Η εφαρμογή των Ευρωκωδίκων στη μελέτη των Ελληνικών θερμοκηπίων, Μετ. Διατρ., Τμ. Γεωπ. Φυτ. και Ζωικ. Παρ/γής Παν/μίου Θεσσαλίας, Βόλος, σελ. 215.

Μ. Θεοχάρης, 2012. Υπολογισμός των στύλων των εγκαταστάσεων αντιχαλαζικής και αντιβροχικής προστασίας στην Ελλάδα, Άρτα, σελ. 254.

Πρακτικά Συνεδρίων

Μ. Θεοχάρης, Χ. Μυριούνης και Α. Σιάνου, 2011. Οι φορτίσεις των θερμοκηπιακών κατασκευών στην Ελλάδα σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, Πρακτ. 7ου Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν., Κωδ. Εργασ. 5.1, Αθήνα.

**ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ
ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΕΚΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΒΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΦΥΣΙΚΩΣ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟΥ ΣΤΑΒΛΟΥ**

Δημήτρης Κ. Παπαναστασίου¹, Θωμάς Μπαρτζάνας¹, Παναγιώτης Παναγάκης², Κωνσταντίνος Κίττας³

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας,
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής και Περιβάλλοντος,

Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, Α' Βιομηχανική Περιοχή Βόλου, Τ.Θ. 15, Τ.Κ. 38500, Βόλος

²Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής,

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, Αθήνα

³Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος,
Οδός Φυτόκου, Τ.Κ. 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

Η θερμική καταπόνηση (ΘΚ) των προβάτων αποτελεί σοβαρή απειλή για την ευζωία τους, αφού επηρεάζει την ανάπτυξη, τις βιολογικές λειτουργίες, την αναπαραγωγή και την παραγωγικότητά τους. Η παρούσα εργασία στοχεύει στη μελέτη της εποχιακής διακύμανσης της ΘΚ, στην οποία ενδέχεται να εκτεθούν τα πρόβατα. Η ΘΚ αποτιμήθηκε με χρήση του δείκτη θερμοκρασίας υγρασίας (Temperature Humidity Index, THI) και του εποχιακού δείκτη Seasonal THI - hrs. Ο δείκτης THI υπολογίστηκε από ωριαίες τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που καταγράφηκαν σε ένα προβατοστάσιο με φυσικό αερισμό κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η ανάλυση έδειξε ότι τα πρόβατα πιθανώς υπέστησαν ΘΚ (THI $\geq$ 22,2) στο 79%, 17% και 11% των ωρών του καλοκαιριού, του φθινοπώρου και της άνοιξης, αντίστοιχα, ενώ δεν υπέστησαν ΘΚ το χειμώνα. Κατά τη διάρκεια όλων των καλοκαιρινών ημερών, η ελάχιστη ημερήσια μέγιστη ωριαία τιμή του δείκτη THI ήταν 24,6, υποδεικνύοντας ότι τα πρόβατα υπέστησαν σοβαρή ΘΚ (THI $\geq$ 23,3). Ο μηνιαίος μέσος όρος των ημερήσιων μέγιστων ωριαίων τιμών του δείκτη THI παρέμεινε πάνω από το όριο της άκρας σοβαρής ΘΚ (25,6) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και πάνω από το όριο της σοβαρής ΘΚ (23,3) το Μάιο και το Σεπτέμβριο. Οι τιμές του εποχιακού δείκτη Seasonal THI - hrs υπό συνθήκες ΘΚ (THI $\geq$ 22,2) ήταν 6596, 975, 0 και 516 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, του φθινοπώρου, του χειμώνα και της άνοιξης, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι τα πρόβατα πιθανώς εκτέθηκαν σε ΘΚ κυρίως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και ότι απαιτείται η λήψη μέτρων ώστε να βελτιωθούν οι κλιματικές συνθήκες εντός του προβατοστασίου ώστε να βελτιωθεί η θερμική άνεση των ζώων, ενόψει και της επερχόμενης κλιματικής αλλαγής.

Λέξεις κλειδιά: προβατοστάσιο, πρόβατα, εποχιακή θερμική καταπόνηση, δείκτης θερμοκρασίας – υγρασίας

**SEASONAL VARIATION OF POTENTIAL SHEEP HEAT-STRESS CONDITIONS
INSIDE A NATURALLY VENTILATED BARN**

Dimitris K. Papanastasiou¹, Thomas Bartzanas¹, Panagiotis Panagakis², Constantinos Kittas³

¹Centre for Research and Technology Hellas, Institute for Research and Technology – Thessaly,
Laboratory of Agricultural Engineering and Environment,

Technology Park of Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, P.O. Box 15, Volos, GR-38500

²Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering,
Laboratory of Farm Structures, Iera Odos 75, Athens, GR-11855

³University of Thessaly, School of Agricultural Sciences, Department of Agriculture Crop Production and Rural
Environment, Laboratory of Agricultural Constructions and Environmental Control,
Fytokou Str., N. Ionia, Magnisia, GR-38446

dkpapan@ireteth.certh.gr, bartzanas@ireteth.certh.com, ppap@aia.gr, ckittas@uth.gr

It is well documented that heat-stress (HS) crucially affects the body growth, the biological functions and the productive and reproductive characteristics of sheep, it is therefore, considered as a serious threat for their short- or long-term thermal welfare. The objective of this paper is to study the seasonal variation of the HS to which dairy ewes are potentially exposed. HS conditions were assessed by means of Temperature Humidity Index (THI) and Seasonal THI - hrs index. THI was calculated using hourly temperature and relative humidity values observed at a naturally ventilated sheep barn during one year. The analysis showed that dairy ewes were exposed to potential HS (THI $\geq$ 22.2) in 79%, 17% and 11% of summer, autumn and spring hours, respectively, whereas no HS was present during winter. During all summer days the minimum daily maximum hourly THI value was 24.6 indicating that sheep experienced severe HS (THI $\geq$ 23.3). The monthly means of the daily maximum hourly THI values remained above the extreme severe HS threshold (i.e. 25.6) during the summer months and above the severe HS threshold (i.e. 23.3) during May and September. The values of the Seasonal THI - hrs index under HS conditions (THI $\geq$ 22.2) were 6596, 975, 0 and 516 during summer, autumn, winter and spring, respectively. These findings clearly verify that dairy ewes were exposed to potential HS mainly during summer and that measures are required so as (i) to improve the indoor climate conditions and consequently improve animals' thermal comfort and (ii) to adapt to the expected climate change conditions.

Keywords: Sheep barn, Dairy ewes, Seasonal heat-stress, Temperature humidity index.

1. INTRODUCTION

Climate conditions within a livestock building affect animal health and welfare. An inadequate thermal environment can affect the incidence and severity of certain endemic diseases, the animals' thermal comfort, growth rate and milk yield, while it can influence indoor air pollution levels (Seedorf et al., 1998; Seinfeld and Pandis, 1998). It is well documented (Thwaites, 1985) that a combination of high ambient temperatures and high relative humidity is unsuitable to sheep. Silanikove (2000) stated that in the long-term growth, milk production and reproduction of ruminants are impaired under HS as a result of the drastic changes in biological functions. Sevi et al. (2001) stated that high temperatures induce adverse effects on the thermal and energy balance, the mineral metabolism, the immune function, the udder health, and the milk production of lactating ewes during summer under the Mediterranean climate. Also, Sevi et al. (2002) reported that high temperatures may induce a worsening of nutritional properties associated with the fatty acid profile of ewe milk. Finocchiaro et al. (2005) found that milk production yields of Mediterranean dairy sheep are affected by HS. Panagakos and Chronopoulou (2010) found that under abnormally hot summer conditions, dairy ewes had respiration rates above normal, while their shade seeking behaviour was also affected. Sevi and Caroprese (2012) concluded that field trials have clearly demonstrated that, even if sheep are considered to be among the most heat tolerant species, exposure to high ambient temperatures has a detrimental impact on their production performance, including milk nutritional and technological properties. The same authors stated that reduction of thermal stress in dairy sheep results in cumulative beneficial effects such as the lengthening of lactation, the maintenance of good processing features of milk and the reduction of veterinary costs.

The increase in temperature that is expected to occur in the future due to climate change may induce various effects to livestock production (Kuczynski et al., 2011). This temperature increase will probably have a direct effect on animals' HS. Segnalini et al. (2011) studied the dynamics of THI over the Mediterranean basin during the period 1951 – 2007 and pointed out an increase of summer THI values. Solymosi et al. (2010) found that the number of HS days increased by 4.1% per year during the period 1973 – 2008 in Hungary. Solymosi et al. (2010) used climate scenario data projected from various combinations of global climate models, future greenhouse gas emission scenarios and regional climate models to predict possible changes in the annual number of HS days that could be observed in the near future (2021 – 2050) relative to the reference period (1961 – 1990). The comparison showed that the 30-year mean of the annual number of HS days is expected to increase by 1 – 27 days, depending on the regional climate model used. In half of the cases examined, the increase is expected to

be at least 1 week. It is worth noting that the last two studies mentioned above underlined that the observed and projected increases, and consequently their impacts, are spatially heterogeneous due to several physical and geographical factors (i.e. atmospheric circulation, regimes of climate variables, latitude, altitude, topography), as well as due to the spatial distribution of the livestock population. Consequently, there is a need to perform temporal and spatial monitoring of HS conditions and to propose protective interventions, taking into account the specific characteristics of every region.

The economic importance of the sheep sector must be pointed out (Theocharopoulos et al., 2007). Sheep farming is the largest livestock sector in Greece, accounting for 30% of the total value of livestock output. Sheep milk and meat are among the major agricultural commodities with a share of ~9% of the total value of agricultural production. Greece is among the main producers of sheep milk and meat in EU as 670 Ktonnes of sheep milk and 80 Ktonnes of sheep meat are produced annually, accounting for the 10% of total EU production.

This study, aims to assess a typical sheep barn for seasonal HS imposed upon dairy ewes and to propose appropriate design solutions concerning structural and environmental control issues.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Facility, animals and climate regime

The experimental trial was run from 01/09/2008 to 31/08/2009 at a sheep barn located 91 m above sea level near the east coast of central Greece (latitude 39° 20' N, longitude 22° 53' E). 500 dairy ewes were housed in the barn, which was naturally ventilated, occupied an area of 879 m² and a volume of 4,777 m³ and had an N-S orientation. A detailed description is given in Papanastasiou et al. (2011). The climate in the greater area where the barn is located is typical of the Mediterranean climate: mild and rainy winters, relatively warm and dry summers and, generally, extended periods of sunshine throughout most of the year.

2.2. Climatic data

Two miniature devices (model Hobo Pro, Onset, USA) were used to monitor air temperature and relative humidity inside and outside the sheep barn. The devices were placed in a white plastic shield with lateral slots for protection. Indoors, the shield was fixed at the middle of the building at ~1.5 m above the ground, while outdoors it was fixed on a mast at ~3 m above the ground at the southwest side of the building. Climatic variables were observed every 15 min. Hourly averaged values are used in the present analysis. Indoors, missing values were negligible, while outdoors values were available from 27/11/2008 and no missing values were detected during the monitoring period.

2.3. Sheep HS assessment

Marai et al. (2007) suggested that an appropriate climatic index to estimate the severity of sheep HS is the Temperature Humidity Index (THI) given in equation 1, where T is the dry-bulb temperature (°C) and RH is the relative humidity (%). The same authors defined four possible categories of HS, namely: < 22.2 = absence of HS; 22.2 to < 23.3 = moderate HS; 23.3 to < 25.6 = severe HS; and ≥ 25.6 = extreme severe HS.

$$THI = T - (0.31 - 0.0031 \cdot RH) \cdot (T - 14.4) \quad (1)$$

Hahn and Mader (1997) introduced the Daily THI - hrs at/or above certain HS thresholds (eq. 2) so as to provide a measure of the magnitude of daily heat load (intensity and duration) on dairy cows.

$$\text{Daily THI - hrs} = \sum_{i=1}^{24} (THI - \text{base}) \quad (2)$$

hr=1,...,24

where THI is the hourly Temperature-Humidity Index and base is a certain HS threshold.

Panagakos and Chronopoulou (2010) used the Daily THI-hrs index to describe the potential dairy ewes' heat burden. They concluded that as heat ensued towards noon, the Daily THI-hrs increased resulting in elevated respiration rate and apparent short-term HS. To our knowledge a seasonal index, has not ever before been used for evaluating potential dairy ewe HS, therefore we propose its application within each season using equation 3:

$$\text{Seasonal THI - hrs} = \sum \text{Daily THI - hrs} \quad (3)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 gives an overall picture of the mean, minimum and maximum values for the dry-bulb air temperature and the relative humidity observed indoors and outdoors during the examined period. It is worth noticing that during the warm period of the year the temperature levels are affected by the sea breeze circulation that frequently develops in the area (Papanastasiou et al. 2010) and by the Etesian winds (Poupkou et al. 2011). The average temperature values inside the barn were 4.6°C, 2.6°C and 1°C higher than those observed outside the barn in winter, spring and summer, respectively. The fluctuations of the temperature differences between the indoor and the outdoor temperature values during winter, spring and summer were further examined. Figure 1 presents the average daily variation of these differences (i.e. indoor temperature minus outdoor temperature). Figure 1 shows that the differences were higher during night-time than during daytime during all the examined seasons. Additionally, the difference remained almost constant during the night hours. These findings reveal that indoor temperature levels were mainly controlled through adjusting the natural ventilation rate (increasing from minimum at winter towards maximum at summer). Ventilation rate was reduced and remained unaltered during the night

resulting in higher and almost stable temperature differences. The amplitude of the temperature difference is smaller in summer. Indoor temperature differed from outdoor temperature by 1°C from 09:00h to 19:00h, namely during the period when natural ventilation is at maximum. Consequently, summer indoor temperature levels were mainly the result of maximum natural ventilation.

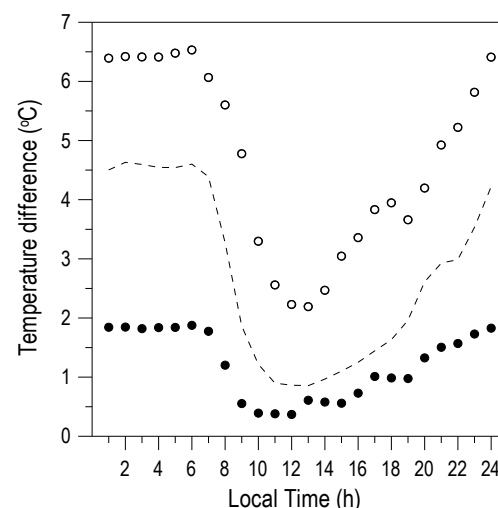


Figure 1. Average diurnal variation of differences between indoor and outdoor temperature values (●: summer; ---: spring; ○: winter).

Information about the THI levels and the HS conditions that prevailed inside and outside the sheep barn during the examined period is given in table 2. The analysis of the hourly THI values revealed that animals were potentially exposed to HS, which varied among seasons. The mean THI values were higher inside the barn than outside the barn. However, the maximum THI levels that prevailed indoors and outdoors were similar. Indoor HS conditions were worse than outdoor HS conditions during summer. HS conditions inside and outside the barn remained almost at the same levels during spring, whereas no HS was present during winter neither inside nor outside the barn. The study of the daily maximum hourly values of THI revealed that peak HS levels inside the barn were similar to those observed outside the barn. The daily maximum hourly value of THI exceeded the extreme severe HS threshold (THI = 25.6) in 92% and 11% of the summer and spring days, respectively, inside the barn while outside the barn the corresponding values were 91% and 11%. It is worth mentioning that the minimum daily maximum hourly THI value that was observed during summer inside and outside the barn was 24.6 and 24.1, respectively, a fact that shows that during all summer days sheep experienced severe HS (THI ≥ 23.3).

The average monthly variations of THI values inside and outside the sheep barn along with the corresponding THI thresholds (i.e. 22.2, 23.3 and 25.6) are presented in Figure 2. This figure shows that THI levels were higher during July than during the other months. The monthly means of the daily maximum hourly THI values remained above the

extreme severe HS threshold (i.e. 25.6) during the summer months and above the severe HS threshold (i.e. 23.3) during May and September. Additionally, the monthly means of the hourly THI values remained

above the severe HS threshold (i.e. 23.3) during the summer months, except the outdoor June's mean value, which was a bit lower but higher than the HS threshold (i.e. 22.2).

Season	Value	Outside		Inside	
		T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
Summer	Mean	25.8	51	26.8	53
	Minimum	14.9	15	16.8	21
	Maximum	38.9	99	37.9	90
Autumn	Mean	NA	NA	18.9	72
	Minimum	NA	NA	9.6	28
	Maximum	NA	NA	32.5	94
Winter	Mean	8.2	77	12.8	75
	Minimum	-2.0	27	5.5	41
	Maximum	21.1	101	21.8	95
Spring	Mean	14.7	70	17.3	68
	Minimum	1.8	19	7.4	30
	Maximum	31.9	100	31.6	93

Table 1. Descriptive statistics for the dry-bulb temperature and relative humidity hourly values observed inside and outside the barn. NA: Not available.

		THI value			Percentage (%) of hours when:		
		Mean	Maximum	Minimum	THI ≥ 22.2	THI ≥ 23.3	THI ≥ 25.6
Summer	Inside	24.9	32.7	16.6	79	69	42
	Outside	23.9	32.7	14.9	67	57	35
Autumn	Inside	18.4	29.3	9.8	17	12	6
	Outside	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Winter	Inside	13.0	20.9	6.1	0	0	0
	Outside	8.6	20.2	-1.4	0	0	0
Spring	Inside	16.9	28.2	7.7	11	8	2
	Outside	14.4	28.1	2.2	10	7	2

Table 2. Descriptive statistics for the hourly THI values and the HS conditions prevailed per season inside and outside the barn. NA: Not available.

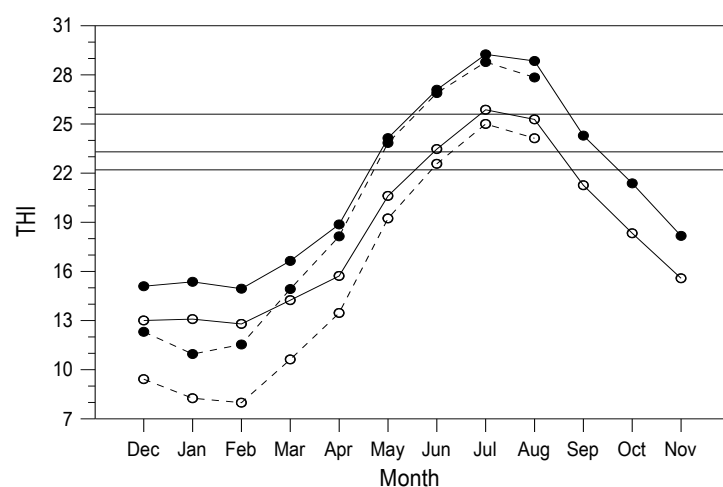


Figure 2. Average monthly variations of THI inside (solid line) and outside (dashed line) the sheep barn (●: monthly means of daily maximum hourly values; ○: monthly means of hourly values).

The dairy ewe potential HS was further assessed by means of the Seasonal THI - hrs index, which was calculated for three HS categories, based on the indoor measurements. Figure 3 shows that the values of the Seasonal THI - hrs index under HS conditions (THI ≥ 22.2) were 6596, 975, 0 and 516 during summer, autumn, winter and spring, respectively. Under moderate HS conditions, the summer Seasonal THI - hrs value was 5.5 and 7.6 times higher than the index values during autumn and spring, respectively. The corresponding factors under severe HS conditions were found equal to 6.4 and 11.6, respectively, whereas during extreme severe HS conditions they were equal to 9.7 and 52.1. These findings clearly indicate that potential HS

was imposed onto dairy ewes mainly during the summer. Additionally, the comparative assessment of Seasonal THI - hrs values shows that the magnitude and intensity of HS are much higher during summer than during autumn and spring.

Under summer conditions dairy ewes were apparently exposed to severe or extremely severe HS potentially burdening their welfare, while they were also partially exposed to severe or extremely severe HS during autumn and spring. The above results call for protective measures so as to improve the indoor climate conditions and consequently improve animals' thermal comfort. Roof insulation so that the indoor thermal microenvironment would not be significantly affected by the outdoor climate

conditions, painting of roof with a white reflective paint in order to reduce the absorption of solar radiation and a ridge opening enhancing natural ventilation due to thermal buoyancy could reduce the potential autumn and spring HS of animals. Moreover, during strenuous conditions, evaporative cooling via using fans combined with fogging could be adopted as a practical and financially viable engineering solution so as to maintain indoor conditions within the thermoneutral zone.

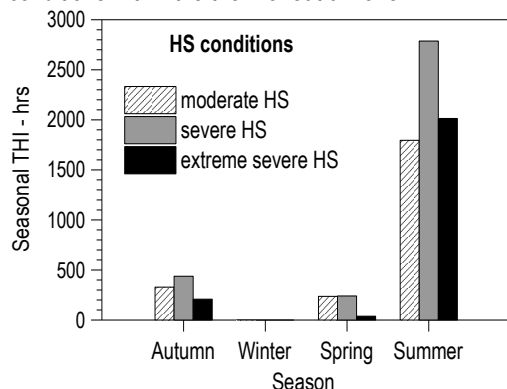


Figure 3. Seasonal THI – hrs.

4. CONCLUSIONS

The potential seasonal HS of dairy ewes housed in a typical sheep barn located at a Greek coastal area was examined in this study. Temperature and relative humidity measurements were used to study the HS conditions inside the barn during a whole year. Hourly values of THI and the values of the Seasonal THI - hrs index were calculated. It is found that the climatic conditions inside the barn impose potential HS upon animals. Dairy ewes were very frequently exposed to potential HS during the summer. HS conditions were almost similar during the transition periods (spring, autumn), being slightly worse in autumn than in spring. No HS was detected during the winter. HS burdens sheep welfare and productivity as well as sheep products which account for a significant part of livestock goods in Greece inducing a great impact on the national economy; therefore protective measures must be taken so as to improve the indoor thermal environment.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Joint Call of ERANET ICT-Agri C-2 projects “Smart Integrated Livestock Farming: integrating user-centric & ICT-based decision support platforms – SILF”

REFERENCES

Finocchiario, R., Van Kaam, J.B.C.H.M., Portolano, B., Misztal, I., 2005. Effect of heat stress on production of Mediterranean dairy sheep. *J. Dairy Sci.*, 88(5):1855 – 1864

Hahn, G.L., Mader, T.L., 1997. Heat waves in relation to thermoregulation, feeding behavior and mortality of feedlot cattle. In *Livestock Environment V, Proc. of the 5th Int. Symp. I: 563-571*. R. W. Bottcher and S. J. Hoff, eds. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Kuczynski, T., Blanes-Vidal, V., Li, B.M., Gates, R.S., Nääs, I.A., Moura, D.J., Berckmans, D., Banhazi, T.M., 2011. Impact of global climate change on the health, welfare and productivity of intensively housed livestock. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 4(2):1–22

Marai, I.F.M., El-Darawany, A.A., Fadiel, A., Abdel-Hafez, M.A.M., 2007. Physiological traits as affected by heat stress in sheep-A review. *Small Ruminant Res.*, 71(1-3):1–12

Panagakis, P., Chronopoulou, E., 2010. Preliminary evaluation of the apparent short term heat-stress of dairy ewes reared under hot summer conditions. *Appl. Eng. Agric.*, 26(6):1035–1042

Papanastasiou, D.K., Fidaros, D., Bartzanas, T., Kittas, C., 2011. Monitoring particulate matter levels and climate conditions in a Greek sheep and goat livestock building. *Environ. Monit. Assess.*, 183(1-4):285–296

Papanastasiou, D.K., Melas, D., Bartzanas, T., Kittas, C., 2010. Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze. *Int. J. Biometeorol.*, 54(3):307–317

Poupkou, A., Zanis, P., Nastos, P., Papanastasiou, D., Melas, D., Tourpali, K., Zerefos, C., 2011. Present climate trend analysis of the Etesian winds in the Aegean Sea. *Theor. Appl. Climatol.*, 106(3-4):459 – 472

Segnalini, M., Nardone, A., Bernabucci, U., Vitali, A., Ronchi, B., Lacetera, N., 2011. Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin. *Int. J. Biometeorol.*, 55(2):253–263

Sevi, A., Annicchiarico, G., Albenzio, M., Taibi, L., Muscio, A., Dell'Aquila, S., 2001. Effects of solar radiation and feeding time on behavior, immune response and production of lactating ewes under high ambient temperature. *J. Dairy Sci.*, 84(3):629–640

Sevi, A., Rotunno, T., Di Caterina, R., Muscio, A., 2002. Fatty acid composition of ewe milk as affected by solar radiation and high ambient temperature. *J. Dairy Res.*, 69(2):181–194

Sevi, A., Caroprese, M., 2012. Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: A critical review. *Small Ruminant Res.*, 107(1):1-7

Silanikove, N., 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.*, 67(1-2):1-18

Solymosi, N., Torma, C., Kern, A., Maróti-Agóts, A., Barcza, Z., Könyves, L., Berke, O., Reiczigel, J., 2010. Changing climate in Hungary and trends in the annual number of heat stress days. *Int. J. Biometeorol.*, 54(4):423–431

Theocharopoulos, A., Melfou, K., Papanagiotou, E., 2007. A microeconomic approach for agricultural development: a dea application to Greek sheep farms. *NEW MEDIT*, 4:48–53

Thwaites, C.J., 1985. Chapt. 2: Physiological responses and productivity in sheep. Vol. II: Ungulates. In *Stress Physiology in Livestock*, 25–38. M. K. Yousef, ed. Boca Raton, FL: CRC Press.

ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

**Χ. Παπαϊωάννου^{1α}, Δ. Καλφούντζος^{1α}, Ι. Γράβαλος^{1α}, Ι. Βαγγέλας^{1β}, Α. Παπαχατζής^{1β},
Μ. Βλαχογιάννης^{1γ}, Σ. Κωτσόπουλος^{1δ}, Α. Αντωνίου²**

^{1α}Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, ^{1β}Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, ^{1γ}Τμήμα Μηχανολογίας, ^{1δ}Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλίας, Τ.Κ. 41111, Λάρισα
²Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Τ.Κ. 81100 Μυτιλήνη
e-mail: xrpapa@teilar.gr

Η έλλειψη του νερού άρδευσης των χωρών της λεκάνης της Μεσογείου η οποία θα είναι ιδιαίτερα έντονη τις επόμενες δεκαετίες και η ανάγκη ορθολογικής χρήσης του νερού άρδευσης στις καλλιέργειες υπό κάλυψη, οδήγησαν τη συγκεκριμένη ερευνητική ομάδα, στην προσπάθεια κατασκευής ενός πρωτότυπου θερμοκηπίου φιλικού προς το περιβάλλον το οποίο θα «παράγει» κηπευτικά, με την ελάχιστη κατανάλωση νερού. Η φιλικότητα του όλου εγχειρήματος προς το περιβάλλον και η ένταξη του στην πράσινη ανάπτυξη, στοιχειοθετείται τόσο από το γεγονός ότι το πρωτότυπο θερμοκήπιο θα θερμαίνεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, δηλαδή ενέργεια αβαθούς γεωθερμίας, όσο και από το ότι κατά τη λειτουργία του, μέρος των υδρατμών του περιβάλλοντος του αέρα του θερμοκηπίου θα ανακτάται με τη μέθοδο της συμπυκνώσεως, ενώ θα υπάρχει και σύστημα συλλογής όμβριων. Τέλος, στην περαιτέρω μείωση των εισροών της καλλιέργειας, θα συμβάλλουν η εφαρμογή του κλειστού συστήματος υδροπονίας, η χρήση δικτύου εντομοστεγανότητας και το πλήρες αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου.

Λέξεις κλειδιά: κλειστό θερμοκήπιο, κλιματική αλλαγή, εξοικονόμηση νερού.

PROTECTED CULTIVATION AND CLIMATE CHANGE

**C. Papaioannou^{1α}, D. Kalfountzos^{1α}, J. Gravalos^{1α}, J. Vaggelas^{1β}, A. Papachatzis^{1β},
M. Vlachogiannis^{1γ}, S. Kotsopoulos^{1δ}, A. Antoniou²**

^{1α}Department of Biosystems Engineering, ^{1β}Department of Technological Agronomists, ^{1γ}Department of Mechanical Engineering, ^{1δ}Department of Infrastructure Engineering, Tech. Educational Institute of Thessaly, 41110, Larissa
²Department of Environment, Aegean University, 81100 Mytilene
e-mail: xrpapa@teilar.gr

The increased lack of irrigation water in Mediterranean countries along with the need for the rational use of irrigation water in greenhouse production, led the research team in constructing a prototype environmentally friendly greenhouse for fruit and vegetable production, under limited water supply which will be the case in the next decades that are following, at the above mentioned area. The friendliness of this cultivation method which is introduced here, is verified not only by the fact that the prototype greenhouse uses renewable energy source for heating (such as shallow geothermal energy), but also by adapting a system that retrieves part of the water vapour of the greenhouse air, collects it and reuse it for irrigation purposes, after condensation. In addition, other methods concerning decreased inputs in greenhouse production will be followed. These are the collection and reuse of rainwater, the use of closed type hydroponics, the cover of the openings with screens and last but not least, the total climate control automation.

Keywords: closed greenhouse, climate change, water preservation.

1. INTRODUCTION

Water quality and quantity is an issue to EU. Unfortunately pollution and climate change have affected water resources and this affects the quality of agricultural products. The EU Water Framework Directive (2000/60/EC) for the protection of all waters with the aim of reaching a "good ecological status" of all Community waters, by 2015. The successful implementation of the Water Framework Directive (WFD) depends strongly on agricultural land use, which is mainly influenced by the Common Agricultural Policy (CAP). EU has a binding target to have 20% of the EU's overall energy consumption coming from renewables by 2020.

For several years, the European Union has been committed to tackling climate change both internally and internationally and has placed it high on the EU

agenda, as reflected in European climate change policy.

Indeed, the EU is taking action to curb greenhouse gas emissions in all its areas of activity in a bid to achieve the following objectives: consuming less-polluting energy more efficiently, creating cleaner and more balanced transport options, making companies more environmentally responsible without compromising their competitiveness, ensuring environmentally friendly land-use planning and agriculture and creating conditions conducive to research and innovation.

The proposed project will demonstrate the ability to achieve high quality agricultural production, and minimize the negative environmental impact, by implementing an innovative approach based on sustainable agricultural development. Project will re-

insure agricultural sustainable production even in a changing environment due to climate change.

2. DESIGN PRINCIPLES

2.1. European projects and Climate change

Due to Climate change, South Europe will suffer by rise of temperature, decrease of annual rainfall and water availability and extensive drought seasons. As the report "Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector, AGRI-2006-G4-05, AEA Energy & Environment and Universidad de Politécnica de Madrid", points out this will result to reduction to crop yields and to suitable crop area. More precisely the member states affected are Portugal, Spain, Italy, Greece, Bulgaria, Slovenia, Cyprus, Malta, South France and South Romania.

Another European project is the one which will be described here. The title of the program is Adapt2Change and it is a LIFE+ project (LIFE09 ENV/GR/000296) aimed at demonstrating adaptation of agricultural production to climate change and limited water supply. The adapt2change project has officially started on the 1st of September 2010 and initially it was planned to last 48 months. It deals with 2 countries Greece and Cyprus, as both having severe problems in water scarcity.

2.2. Adapt2Change principles

The objectives of the Adapt2Change project can be summarized as follows:

- Minimize fresh water use for agricultural production and introduce water recycling method in rainfall and in a closed greenhouse system.
- Demonstrate how shallow geothermal energy may be used in water recycling process and introduce renewable energy in agricultural sector.
- Produce a relevant management automation system for greenhouse maximization production and high coefficient in energy efficiency.
- Comply with reformed CAP by:
- Improving the competitiveness of European farmers enabling them to cope with the growing water scarcity, high fuel prices and fight external competition.
- Improving the competitiveness of rural areas.
- Maintaining the environment and preserve Europe's rural heritage.
- Evaluation of projects findings on water recycling in agriculture on national agricultural policy (Greece - Cyprus).
- Minimize land requirements for agriculture use.
- Minimize environmental effects of agriculture.
- Decrease the emissions of greenhouse gases and assist the farmers to comply with current and upcoming environmental regulations.
- Adapt agricultural production practices to the constraints and opportunities of a changing climate in 2 levels:
- Farm-level adaptation.
- Sectorial-level adaptation.
- Demonstrate a production system suitable for a wide range of environmental conditions.

-Provide to producers a Remote Support System.

2.3. Actions and means involved in the project

2.3.1. Project Management and Monitoring

This action ensured that all project activities has been carried out according to the planned time-table and financial provisions and that their output is consistent with the project's scope and specific objectives which are of high quality. In addition, this action ensured that sharing of information among project partners was effective; the project's webportal was prepared in due time; reporting to the EC on project progress.

2.3.2. Preparation Activities - Site Preparation & Prototype Unit Construction

Project proposes the use of a three components system for minimizing water & energy consumption in agriculture, thus shallow geothermal component, water recycling unit (concentrator) and the prototype greenhouse. These components were calibrated and adapted to each location. For geothermal component the preparatory activities included the selection of energy transfer method, the site preparation and the definition of geothermal usage for energy savings. For the greenhouse component preparatory activities included the greenhouse type and cover material selection the innovative design aspects in the construction and the automation design. Finally water recycling unit (concentrator) was designed according to geothermal and greenhouse needs.

2.3.3. Testing & Cultivation Periods – Demonstration of Technical and Financial Ability

Testing period insured that equipment and procedures are working as initially designed. The horticulture production is very fragile and sensitive; hence it is important that sufficient tests are carried out, in order to minimize risk of failure in the planned production efforts. Tests included equipment testing, unit - equipment fine tuning. Moreover, representative species of vegetables and fruits will be cultivated, during different seasons in all project's duration.

2.3.4. Communication Strategy & Effective Dissemination of Project Deliverables

The action executes a comprehensive communication plan for promoting water recycling and preservation through advertisement/advertorials, press releases, project brochures, newsletters, website, buntings and leaflets. These strategies will support the project to reach the respective target groups and ensure that the outputs, the results and the outcomes will be replicated collectively to the target groups and final beneficiaries. Moreover, partners will also participate at similar commercialization events (conference-exhibition-seminar) for promoting the project and establish contacts with stakeholders.

Demonstrating to potential users on the prototype is the most effective method of communication with stakeholders. Demonstration will help new users to

understand the necessity of water preservation and of high quality agricultural production.

2.3.5. Awareness Campaign on Agriculture Adaptation to Climate Change

The aim of this action is to ensure that project progress and outputs are disseminated as effectively as possible and to stimulate environmental awareness in order to promote sustainable water use in agricultural sector, after the end of the project. Especially project aims to stakeholders that are highly influenced by Common Agriculture Policy adoption.

2.3.6. After Life Communication Plan

The "After-LIFE Communication Plan" is a separate action, containing information on how TEI of Thessaly and the associate beneficiaries of the project, will continue disseminating and results communicating after project's completion.

3. THE PROJECT NOWADAYS IN GREECE

Up today, the project's execution regarding installations is almost complete, except the hydroponic installation (which is now executing) and automation control systems application.

3.1. Geothermal Unit and Heat pumps

According to greenhouse dimensions, plant density and local climatic data, energy needs were estimated to be 70 kW. This will be provided by 2 equal heat pumps (Picture 1), installed in the engine room (Figure 1). The geothermy gain in the area and depth of interest is almost 70 W/m, thus 1000 m of pipe is needed (10 boreholes X 100 m depth each), to cover the proper energy load. The distance between the drilling boreholes is 6 m to prevent any thermal short circuit creation, and therefor ineffective operation of the geothermal system, which is a closed loop geothermal system. Each borehole has 2 pairs (one per heat pump) of plastic polyethylene pipes (PE100) of diameter of 40 mm. Quartz sand filled the boreholes for heat induction maximization.

Two water/water heat pumps (EPH 36 Geo) with necessary tanks of inertia (150 L, each)



Picture 1. Heat pumps, tank of inertia and dilatation tanks of the water circuit, installed in the Engine room. Except the metal pipes, the special pipes (green colored) of PVC (Diam. 60 mm) of water recycling unit can be seen.

(Picture 1) for energy saving purposes were installed in the Engine room (Figure 1),

Heat pumps are equipped with scroll type compressors and automatic reversal to the refrigeration operation cycle. Each heat pump has cooling capacity of 37.9 kW under the following operation conditions: plant exchanger water (inlet/outlet) 12/7°C, external source water temperature (inlet/outlet) 15/30°C and heating capacity of 47.7 kW under the operation conditions: plant exchanger water (inlet/outlet) 30/35°C, external source water temperature (inlet/outlet) 15/10°C. The refrigerant fluid is the R407c and the C.O.P is almost 5.2 according to the provider (it is going to be calculated).

3.2. Greenhouses

Two similar double-arc'd (modified) type plastic greenhouses, N-S oriented and located in the experimental farm of the Technological Educational Institute of Thessaly (Latitude 39° 37', longitude 22° 22', altitude 75 m) were constructed. The geometrical characteristics of each greenhouse are: eaves height 4.0 m; ridge height 5.2 m; total width 12 m (2 arcs 6 m width each); total length 18 m; ground area 216 m² with the lobbies (marked darker, at Figure 1).

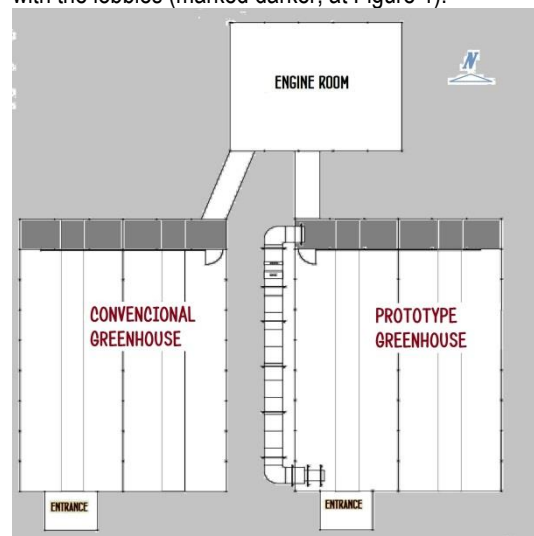


Figure 1. Top view of Adapt2change installations

The volume of every greenhouse is 999 m³. The roof is covered by plastic film (installed on April 2012), which is a three layer LDPE film 172 µm thick, with transmissivity of 0.92. Side walls are covered by polycarbonate (mini trapezoidal), 0.5 mm thick.

The ventilation of the greenhouses is either natural (roof window, 1.7 m X 18.0 m, upside-down type, screened by a 55 x 27 mesh net, Picture 1, Picture 2, Figure 1), or forced meaning 4 northern openings (1.4 m X 2.0 m) installed in the lobby and 4 openings (1.0 m X 1.2 m) at the southern side of the main greenhouse area (Picture 2) powered by electrical motors (19.000 m³ h⁻¹), powered by a 0.75 HP three-phase motor.

Temperature and vpd measurements are taken in the center of each greenhouse (1.5 m above the

ground). Climate and nutrition of the plants will be automatically controlled according to the following set points: 21°C day temperature, 15°C night temperature, 23°C ventilation activation, 2.1 mS cm⁻¹ electrical conductivity and pH of the nutrient solution 5.6.

Weed control was executed by permanently covering the soil with double-side (black-white) plastic mulch.

Heat distribution in both greenhouses will be achieved through the circulation of hot water, within plastic tubes of corrugated outer surface, of 20 mm diameter (6 atm).



Picture 1. Interior of the prototype greenhouse



Picture 2. The lobby (wet pad on the left, blinds of fresh air on the right, the end point of the outside duct of the water/air recycling unit in the center, the 4 green pipes of the 2 heat exchangers)

In each greenhouse on the northern side, there is a lobby (Figure 1, Picture 2) which is an isolated area of 24 m² (2 X 12) where the air before entering the main greenhouse area is prepared. Between the lobby and that area, there is pad (10.0 m X 1.20 m) for cooling purposes (Picture 1, Picture 2).

3.3. Air/Water recirculation system

This system is provided only in the prototype greenhouse (Figure 1, Picture 3). It is a rectangular 22 m long duct, with a square cross section (1 m x 1 m) and double side walls of thermo galvanized steel (containing rockwool of proper width, for sufficient isolation).

Depending on the conditions the central control system will decide if the inside air of the greenhouse (after the crop) will be either extracted in the external

environment, or be introduced through the recycling water/air pipeline.

When it is forced to enter the duct, it continuous outside the greenhouse and after sufficient distance, it meets the 2 heat exchangers for mass and energy exchange.



Picture 3. South side view of the prototype greenhouse located in Larissa, with the rectangular isolated duct of the water/air recycling unit.

3.3.1. 1st Heat exchanger (Cooling)

The air after betaken into the duct due to sufficient distance is passing through the first heat exchanger (cooling) is temperature is lowered hence its dehumidification is succeeded, ought to enthalpy decrease. At this position the bottom of the duct is designed to collect the water in a plastic tank and irrigate the crop through the hydroponic head. This system is expected to deliver 30 L per hour.

3.3.2. 2nd Heat Exchanger (Heating)

After the air has been drying out by the 1st heat exchanger (cooling), it will passes through the 2nd heat exchanger (heating) and if is needed (depending on the needs of the greenhouse) is heated. The system will operate automatically and will be controlled by the central control unit.

In addition, in prototype greenhouse there is rainwater collection. Thus, in total in the prototype greenhouse there are 3 plastic tanks (condensation water from the water/air recycling unit, rainwater and cooling pad water) while in the convectional greenhouse there is only one (pad water).

4. DISCUSSION

To provide economically optimal micro-environments for plant growth, producers can use or control the number of glazing layers, insulation curtains or screens to reduce long-wave radiation losses at night, reduced or increased ventilation rates, evaporative coolers, and shading devices to control incoming solar radiation (Yildiz and Stombaugh, 2006).

Agriculture today faces many challenges. WFD and CAP are pushing agriculture to a more sustainable status by minimizing pollution and by reaching higher ecological status. Resource management and food security in a changing

environment due to climate change is another issue that agriculture has to tackle.

By introducing an innovative method of cultivation within a controllable environment, many of these issues may be resolved. The project focuses in greener greenhouse production decreasing the energy and water consumption using shallow geothermal energy.

Many techniques have been developed which are already used in order to cool the air and consistently the plants within a greenhouse. In these methods water is sprayed in the greenhouse absorbing heat. From liquid phase water is turned into vapor phase and is rejected because of the higher temperature and thermal energy that it carries. As a result growers need to re-compensate this loss by pumping more water to the greenhouse. In this way growers imitate the natural cooling method that plants use.

Concentrating water vapor it is possible to recover as much as is possible water quantities, within a greenhouse. The energy requirements for recycling water within a closed greenhouse are enormous but of low enthalpy. For this reason shallow geothermal energy is an adequate source for this application. The advantages are obvious. It can be found anywhere and it is a renewable source. The infrastructure is based on relatively low tech equipment and it can be applied easily everywhere.

For all activities of the proposed project, special care has been taken in order to reduce the project's carbon footprint. More precisely:

- Shallow geothermal energy use.

A 75% reduction in conventional energy consumption and CO₂ emissions are expected to be achieved by using shallow geothermal energy. Heat or cooling is achieved by carrying energy from the ground to the installation. Energy is required only for this process.

- Prototype

All materials and components of the prototype unit will be fully recyclable. Contractors will attend a short course on minimizing CO₂ emissions and during construction contractors will reduce CO₂ emissions. All prototype parameters will be monitored remotely.

- Remote Control

Support (RCS) will minimize travels. The Installed energy system is managed automatically for greater efficiency.

- Minimization of travels:

All participants have agreed to decrease the number of travels to the minimum. In this context, web facilities like virtual conference tools (e.g. Skype) will be used for internal communication. The need for field trips for sampling is minimized through the use of satellite imagery. A small number of field trips are however considered necessary, for the collection of soil samples; in those cases, a low consumption vehicle will be used.

- Minimum Paper Use.

All project documents and information will be exchanged among project partners by email and web-based word processor and spreadsheet, which allow partners to share and collaborate online. Project documentation (including reports, brochures, flyers, etc.) will be available exclusively in digital format (except for layman report).

- Reducing energy demand.

Partners have agreed to use low consumption equipment and recycle all possible material.

5. CONCLUSIONS

The Adapt2change project is a very hopeful project and hopefully all the obstacles and the delays are in the past. The installations are of higher quality than the initial standards. Verification of the project goals including the crop material results and modeling of energy and crop performance is what is needed for the direct future.

Acknowledgements: This work is executing under the framework of the project: ADAPT2CHANGE, LIFE09 ENV/GR/000296, "Adapt agricultural production to climate change and limited water supply", co-financed by European and National Funds. Thanks are due to Mr. V. Kostoulis for the technical support. Special thanks are due to Mr. C. Karaboumliotis, Mr. A. Alexandrou as well as Mrs D. and Mr. C. Emmanoulidis for the excellent collaboration.



adapt²change

REFERENCES

Conference Proceedings

- I. Yildiz, D.P. Stombaugh, 2006. Heat Pump Cooling and Greenhouse Microclimates in Open and Confined Greenhouse Systems. ISHS Acta Horticulturae 719: International Symposium on Greenhouse Cooling.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΑΓΡΟΚΗΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

A-M. Κοσμόπουλος¹, Σ. Νάστης², Θ.Α. Κωτσόπουλος¹ και Γ. Μαρτζόπουλος¹

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Εγγείων βελτιώσεων και Γεωργικής Μηχανικής, Τ.Κ. 54124, e-mail: mkosmop@hotmail.com

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Αγροτικής Οικονομίας, Τ.Κ. 54124

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη οικονομικοτεχνική αξιολόγηση που αφορά ένα πρότυπο ενεργειακά αυτόνομο αγρόκτημα στην περιοχή της Αν. Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα, η μελέτη εστιάστηκε σε ένα τμήμα έκτασης 25 στρεμμάτων στην περιοχή του αγροκτήματος της Γεωπονικής Σχολής του Α.Π.Θ., το οποίο περιλάμβανε ένα κτηνοτροφικό κτίριο, ένα σφαγείο, ένα κτίριο κατοικίας, έναν ξενώνα και μία καλλιεργήσιμη έκταση αραβόσιτου. Υπολογίσθηκαν οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες του αγροκτήματος σε θέρμανση και ηλεκτρισμό. Το ζητούμενο ήταν η κάλυψη των προϋπολογισθεισών συνολικών καταναλώσεων σε ενέργεια όλων των προαναφερόμενων εγκαταστάσεων με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννητριών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματολογικά δεδομένα της εν λόγω περιοχής και συγκεκριμένα η ηλιοφάνεια της περιοχής και το αιολικό της δυναμικό. Με τα δεδομένα αυτά διαστασιολογήθηκαν οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία απαιτούνται, προκειμένου να ικανοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες του πρότυπου αγροκτήματος. Επιπλέον, υπολογίσθηκε η οικονομική απόδοση της εν λόγω επένδυσης και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη βιωσιμότητα και τον χρόνο της απόσβεσης της. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν: α) ότι είναι δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πρότυπου αγροκτήματος με τη χρήση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα να είναι σημαντική η εξοικονόμηση ενέργειας σε συμβατικούς πόρους και β) ότι είναι οικονομικά βιώσιμη μία τέτοια επένδυση.

Λέξεις κλειδιά: οικονομικοτεχνική, ενεργειακές ανάγκες, αυτόνομο αγρόκτημα

TECNOECONOMICAL APPROACH OF AN ENERGY SELF-SUFFICIENT PROTOTYPE FARM IN THE AREA OF EASTERN THESSALONIKI

A-M. Kosmopoulos¹, S. Nastis², T.A. Kotsopoulos¹ and G. Martzopoulos¹

¹Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124, Greece

²Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124, Greece

In this paper, an integrated techno-economic approach of an energy self-sufficient prototype farm, in the area of eastern Thessaloniki, is presented. Especially, this study focused to an area of land that occurs 2,5 acres and belongs to the Agricultural Faculty, and includes corn plantation, a livestock building, a slaughterhouse, a house for the owners and a guest house. The total energy demands of the whole farm to heating and electricity was estimated. The goal was to cover the total energy consumption that were estimated for the whole farm with the usage of wind generators and photovoltaic panels. To accomplish this aim the sunshine and wind potential of the area were used. With these data, wind generators and photovoltaic panels were dimensioned, in order to cover the energy consumption of the prototype farm. The conclusions derived from this study showed that: a) it is possible to cover the energy demands of the prototype farm with the usage of wind generators and photovoltaic panels and thus, the energy saving to conventional resources is important and b) that such an investment is economically viable.

Keywords: tecnoeconomical, energy needs, self-sufficient farm

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση του κόστους κτήσης των ορυκτών καυσίμων και η αστάθεια στην τιμή τους σε συνδυασμό με τη ρύπανση της ατμόσφαιρας που προκαλείται από τη χρήση τους καθιστούν αναγκαία την εξεύρεση νέων πηγών ενέργειας. Οι νέες πηγές θα πρέπει να προσφέρουν οικονομικά προσιτή ενέργεια η οποία θα είναι παράλληλα και φιλική προς το περιβάλλον. Φιλικές προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η βιομάζα κ.α, και ως επί το πλείστον οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (Μαρτζόπουλος Γ., 2008). Με τον όρο «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)», αναφερόμαστε στην ενέργεια από

ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή, η αιολική, η αεροθερμική, η γεωθερμική, η υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, η υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλύόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από τα αέρια που παράγονται σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και από τα βιοαέρια. (Οδηγία 2009/28/Ε.Κ.). Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) έχει έναν επιπλέον λόγο να ενδιαφέρεται για τη διεύθυνση των Α.Π.Ε. στην τελική ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας, ο οποίος είναι ότι η Ε.Ε. έχει σημαντική ενεργειακή εξάρτηση από τρίτες χώρες. Η Ε.Ε. προκειμένου να προωθήσει τη χρήση των Α.Π.Ε. στον Ευρωπαϊκό χώρο έθεσε

τους παρακάτω δεσμευτικούς στόχους που αφορούν το έτος 2020 (ΥΠΕΚΑ):

- Μείωση κατά 20% των εκπομπών σε CO₂ σε σχέση με το έτος 1990
- Αύξηση της συμμετοχής των Α.Π.Ε. στο 20% στην τελική ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας
- Μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω τη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης

Με γνώμονα τα παραπάνω στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός αγροκτήματος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εργασία εστιάζεται σε ένα υποθετικό αγρόκτημα, του οποίου υπολογίζονται οι ενεργειακές του ανάγκες. Με βάση τις ανάγκες αυτές διαστασιολογούνται οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα που απαιτούνται προκειμένου να καλυφθούν οι προϋπολογισμένες καταναλώσεις. Ακολουθεί μία οικονομοτεχνική αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος από όπου εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη βιωσιμότητα του συστήματος.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Υπολογισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας

Προκειμένου να υπολογιστούν οι ενεργειακές ανάγκες του αγροκτήματος σε ηλεκτρισμό και θέρμανση, το αγρόκτημα χωρίστηκε σε επιμέρους τμήματα. Τα στοιχεία για τις ενεργειακές καταναλώσεις του κάθε τμήματος προέκυψαν από προσωπικές συνεντεύξεις με ιδιοκτήτες παρόμοιων εγκαταστάσεων. Οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό και θέρμανση που λήφθηκαν υπόψη για τα επιμέρους τμήματα του αγροκτήματος εμφανίζονται παρακάτω:

Βουστάσιο (10 Αγελάδων Γαλακτοπαραγωγής)

Στο βουστάσιο καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για το φωτισμό, την άμελη των ζώων, τις αυτόματες ταΐστρες και ποτίστρες και κυρίως για την απομάκρυνση και διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων και την άντληση του νερού με τη χρήση γεώτρησης. Από προσωπικές συνεντεύξεις με αγελαδοτρόφους προέκυψε ότι μία τέτοια κτηνοτροφική εγκατάσταση καταναλώνει από 500-1000kWh το μήνα.

Βιομηχανικό σφαγείο

Στο βιομηχανικό σφαγείο καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία ψυγείων, καταψύξεων και πιθανότατα για την λειτουργία καμερών για την συνεχή παρακολούθηση των ζώων. Από προσωπικές συνεντεύξεις με ιδιοκτήτες βιομηχανικών σφαγείων ότι μία τέτοια μονάδα που παράγει 700 τόνους κρέας, για να λειτουργήσει, απαιτεί ενέργεια 3000-3500 kWh/μήνα.

Καλλιέργεια αραβόσιτου

Στην καλλιέργεια αραβόσιτου καταναλώνονται 50m³ νερού για την κάλυψη των αναγκών μιας έκτασης 100 στρεμμάτων. Για την κάλυψη των αναγκών σε άρδευση καταναλώνονται περίπου 8000kWh για 3 μήνες το έτος.

Κατοικία ιδιοκτητών

Στην κατοικία των ιδιοκτητών πάρθηκε ως δεδομένο ότι η μέση κατανάλωση ενός νοικοκυριού ανέρχεται στις 6000 kWh/έτος. Λόγω του ότι οι ενεργειακές ανάγκες σε ρεύμα ενός μέσου νοικοκυριού 4 ατόμων ανέρχεται σε 5000 - 7000 kWh/έτος.

2.2. Προτεινόμενη εφαρμογή Α.Π.Ε.

Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, προτείνονται τα εξής:

- Τα Φ/Β στοιχεία να καλύψουν τα 2/3 των ενεργειακών αναγκών και
- Οι Α/Γ να καλύψουν το 1/3 των ενεργειακών αναγκών

Αυτό προέκυψε για δύο κυρίως λόγους:

- λόγω κόστους, καθώς το αρχικό κόστος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι υψηλότερο από ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- λόγω της περιοδικότητας των ανέμων

2.2.1. Μεθοδολογία διαστασιολόγησης για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία

Για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Sunny Design της εταιρείας SMA. Το Sunny Design είναι ένα δωρεάν λογισμικό που έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Παράλληλα με τον τεχνικό έλεγχο των διαφόρων εξαρτημάτων, το λογισμικό παρέχει επίσης δεδομένα για την οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης. (<http://www.smahellas.com/el/proionta/logismiko/sunny-design.html>).

Χρησιμοποιήθηκε το Complete Package επειδή αυτό περιλαμβάνει ήδη όλα τα γεωγραφικά δεδομένα για πολλές τοποθεσίες, ανάμεσα στις οποίες είναι και η Θεσσαλονίκη.

Σύμφωνα με τους όρους που ισχύουν, η εγκατάσταση πρέπει να παρέχει τριφασικό ρεύμα στο δίκτυο. Συνεπώς, θα επιλεγούν είτε τέσσερις μονοφασικοί μετατροπείς είτε ένας τριφασικός. Στην περίπτωση μας επιλέγονται τέσσερις μονοφασικοί μετατροπείς. Ο μικρότερος τριφασικός μετατροπέας της SMA είναι ο Sunny Tripower STP10000TL, ο οποίος έχει ως χαρακτηριστικό του την πολύ υψηλή απόδοση. Το λογισμικό δείχνει ότι ο συγκεκριμένος

συνδυασμός πάνελ – μετατροπέα είναι συμβατός, και το σύστημα λειτουργεί κανονικά.

2.2.2. Μεθοδολογία διαστασολόγησης για τις ανεμογεννήτριες

Για να καλυφθεί το υπόλοιπο των ενεργειακών αναγκών του αγροκτήματος, προτείνεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα δόκιμα υπολογιστικά στοιχεία που μας δίνουν την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες.

Η παραγωγή ενέργειας από Α/Γ προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο (Αραβαντινός κ.α., 1997):

$$E = N * K * A * V_{\mu}^3 \quad \text{όταν } V_e \leq V_{\mu} \geq V_a$$

Όπου :

E : ετήσια ηλεκτρική ενέργεια
N : αριθμός ομοειδών ανεμογεννητριών
K : συντελεστής
V_μ : μέση τιμή του ανέμου σε m/s
A : επιφάνεια σάρωσης σε m²
V_ε : ταχύτητα έναρξης
V_α : ταχύτητα αποκοπής

2.3. Οικονομική ανάλυση με τη μέθοδο της παρούσας αξίας

Μεθοδολογία

Για την πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε η Παρούσα Αξία (στην οποία το επιτόκιο ήταν 6% το 2010).

ο τύπος της Παρούσας Αξίας είναι :

$$Π.Α. = K_n / (1+i)^n$$

Όπου

K_n : τα ετήσια οφέλη του συστήματος στο έτος n

i : το επιτόκιο (6%)

n : το έτος

(Παπαναγιώτου Ε., 2003)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Ανάγκες σε ενέργεια

Επειδή τα δεδομένα που συλλέχθηκαν οδηγούν σε μια πολύ μεγάλη διακύμανση τιμών καταναλώσεων, γι' αυτό προτιμήθηκε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες μιας εικονικής εγκατάστασης, βασισμένη σε μέσους όρους.

Οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες καταναλώσεων προέκυψαν από το άθροισμα των επιμέρους ενεργειακών καταναλώσεων της κατοικίας ιδιοκτητών, του σφαγείου, της καλλιέργειας αραβοσίτου και της κτηνοτροφικής εγκατάστασης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Καταναλισκόμενη Ενέργεια	
Κατοικία Ιδιοκτητών	
Επιφάνεια τ.μ.	100τ.μ.
Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες	6000kWh/έτος
Κτηνοτροφική Εγκατάσταση	
Επιφάνεια τ.μ.	100 τ.μ.
Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες	Για 10 αγελάδες γαλακτοπαραγωγής 10000kWh/έτος
Σφαγείο	
Ετήσια παραγωγή κρέατος	700tn
Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες	36000kWh/έτος
Καλλιέργεια αραβοσίτου	Έκταση 15 στρ.
Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για άρδευση	8000kWh/έτος
Συνολικές ενεργειακές ανάγκες	60000kWh/έτος

3.2. Φωτοβολταϊκα στοιχεία – ανεμογεννήτριες

3.2.1. Φωτοβολταϊκά

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από τη χρησιμοποίηση του λογισμικού, φαίνεται ότι όλα λειτουργούν ομαλότατα, με την αποδοτικότητα του μετατροπέα να είναι στο 97,4% και το σύστημα συνολικά να αποδίδει 52267 kWh/έτος. Με την τιμή 0,45€/kWh, αποφέρει 52.267*0,45=23.520 €/έτος (η τιμή πάρθηκε για το έτος 2010 και από το Ν3851/10 ΦΕΚ85Α).

Η διάταξη και η τοποθέτηση του Συστήματος θα γίνει στο νότιο τμήμα του αγροκτήματος έτσι ώστε να είναι εκμεταλλεύσιμη στον μέγιστο βαθμό η ηλιοφάνεια της περιοχής. Θα αποτελείται από δύο στοιχειοσειρές για κάθε έναν από τους 4 μετατροπείς, η κάθε μία από τις οποίες έχει 24 δομοστοιχεία, και οι συνολικές διαστάσεις του συστήματος θα είναι 24 μέτρα μήκος και 2*1,66 = 3,32 μέτρα σε ύψος για κάθε έναν από τους μετατροπείς, με κλίση 25°, κατά τα στοιχεία του λογισμικού Sunny Design.

Για την τοποθέτηση των τεσσάρων στοιχειοσειρών του κάθε μετατροπέα θα χρειαστούν 100 μέτρα μήκος (μέσα σε αυτό το μήκος περιλαμβάνονται δύο μέτρα απόσταση ανάμεσα στα συστήματα των στοιχειωσειρών) και ύψος 3,32 μέτρα.

Σύμφωνα με τον πίνακα 1, οι συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις σε ενέργεια τόσο των εγκαταστάσεων όσο και της καλλιέργειας ανέρχονται στις 60000kWh/έτος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, προτιμήθηκε να καλυφθούν τα 2/3 των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (δηλαδή 40000kWh/έτος). Για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν τέσσερις μετατροπείς ο καθένας από τους οποίους θα ελέγχει μία διπλή σειρά από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Κάθε μία από τις διπλές σειρές θα αποτελείται από 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οπότε σε κάθε μετατροπέα θα αντιστοιχούν 48 φωτοβολταϊκά πλαίσια (σύμφωνα με το λογισμικό, η επάνω σειρά θα αποτελείται από 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια και η κάτω σειρά από 23, όπου καθαρά για αισθητικούς λόγους θεωρήθηκε ότι και στην κάτω σειρά θα εγκατασταθούν 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια). Ανάμεσα στις διπλές σειρές των πλαισίων αφήθηκαν 2 μέτρα κενό για την ασφάλεια των πλαισίων. Με βάση τη συγκεκριμένη διάταξη σύμφωνα με το λογισμικό Sunny Design, τα 192 φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σύνολο παράγουν 52266,8 kWh/έτος κατά προσέγγιση. Δηλαδή όχι μόνο καλύφθηκαν οι ενεργειακές ανάγκες που είχαμε θέσει ως στόχο στο ξεκίνημα της μελέτης, αλλά παράλληλα δίνεται και η δυνατότητα στον ιδιοκτήτη του συγκεκριμένου αγροκτήματος να επωφεληθεί περισσότερο, παραχωρώντας και τις εναπομείναντες kWh στην ΔΕΗ.

3.2.2. Ανεμογεννήτριες

Πάρθηκε ότι η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας είναι $V_e = 4\text{m/s}$ (η ταχύτητα αυτή προέκυψε από τον μ.ο. των ταχυτήτων του ανέμου από την Ε.Μ.Υ. τόσο από τον σταθμό της Μίκρας όσο και από της Θεσσαλονίκης γενικότερα), η ταχύτητα αποκοπής είναι $V_a = 25\text{m/s}$ και η μέση ταχύτητα είναι $V_\mu = 4,5\text{m/s}$. Η ακτίνα $R = 3,5\text{m}$ και το $K = 2,5$. (EMY 2010)

Από τις ενεργειακές καταναλώσεις του πίνακα 1, προτιμήθηκε να καλυφθεί το 1/3 των συνολικών ενεργειακών αναγκών (δηλαδή 20000 kWh/έτος). Η συγκεκριμένη απόφαση πάρθηκε κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους τόσο της αγοράς όσο και της εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας σε σύγκριση με ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Οπότε για $N = 1$:

$$A = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot (3,5)^2 = 38,46\text{m}^2$$

$$E = 1 \cdot 2,5 \cdot 38,46 \cdot 91,125 = 8.762 \text{ kWh/έτος}$$

Για $N = 3$:

$$E = 3 \cdot 2,5 \cdot 38,46 \cdot 91,125 = 26.286 \text{ kWh/έτος,}$$

αποφέρει 26.286*0.25=6571.5€/έτος.

Με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου μαθηματικού τύπου που υπολογίζεται η συνολική ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, εξήχθη ως αποτέλεσμα ότι μία ανεμογεννήτρια με ακτίνα $R = 3,5\text{m}$ μπορεί να δώσει ετησίως 8.762kWh. Συνεπώς με την τοποθέτηση τριών ομοειδών ανεμογεννητριών δίνεται η δυνατότητα να υπερκαλυφθούν οι υπολειπόμενες ανάγκες του αγροκτήματος, καθώς

με τις τρεις ανεμογεννήτριες μπορούν να παραχθούν μέχρι και 26.286kWh/έτος.

3.2.3. Κοστολόγηση και χρόνος Απόσβεσης της Επένδυσης

Από τη διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών υπολογίζεται το αρχικό κόστος της εγκατάστασης :

$$3 \text{ A/G} : 30.000 \cdot 3 = 90.000\text{€} \text{ (τρέχουσες τιμές της αγοράς, έτος 2010)}$$

$$\Phi/B: 420 \cdot 190 = 79.800\text{€}$$

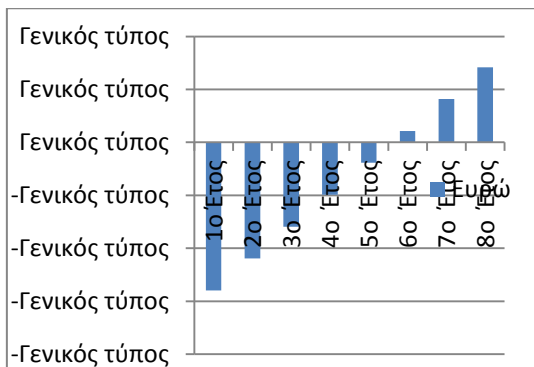
$$\text{Σύνολο} : 169.800\text{€}$$

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της επένδυσης από το 1ο έτος μέχρι και το 8ο έτος. Από το 6ο έτος και μετά αρχίζει να πραγματοποιείται η απόσβεση του κεφαλαίου που χρησιμοποιήθηκε για τις εγκαταστάσεις και την απόκτηση ετήσιου εισοδήματος.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα από την οικονομική ανάλυση με τη μέθοδο της Παρούσας Αξίας

Έσοδα (€)				
	1ο Έτος	2ο Έτος	3ο Έτος	4ο Έτος
Κόστος Συστήματος (€)				
169.800	- 139709	- 109617	-79525	- 49433
Ετήσια Οφέλη Συστήματος (€)				
30.092				

Έσοδα (€)				
Κόστος Συστήματος (€)	5ο Έτος	6ο Έτος	7ο Έτος	8ο Έτος
169.800				
Ετήσια Οφέλη Συστήματος (€)	-19341	10751	40843	70935
30.092				



Σχήμα 1. Το πραγματικό κέρδος για το 60 έτος που ξεκινάει το κέρδος της επένδυσης υπολογίστηκε ως εξής:

$$\text{Π.Α.} = K_n / (1+i)^n = 10751 / (1+0.06)^6 = 7.852\text{€}$$

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν: α) ότι είναι δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πρότυπου αγροκτήματος με τη χρήση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα να είναι σημαντική η εξοικονόμηση ενέργειας σε συμβατικούς πόρους και β) ότι είναι οικονομικά βιώσιμη μία τέτοια επένδυση.

Συνεπώς προκύπτει ότι είναι δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πρότυπου αγροκτήματος με τη χρήση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα να είναι σημαντική η εξοικονόμηση ενέργειας σε συμβατικούς πόρους και να είναι οικονομικά βιώσιμη μία τέτοια επένδυση.

Acknowledgements

This research paper has been conducted in the context of the GREEN-AgriChains project that is funded from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7-REGPOT-2012-2013-1) under Grant Agreement No. 316167. All the above reflect only the authors' views; the European Union is not liable for any use that may be made of the information contained herein.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αραβαντινός,Α., Βλαστός,Θ., Εμμανουήλ,Δ.,
 Μαρίνος – Κουρής,Δ., Σκίνος,Γ., Σμπόνιας,Κ.,
 Τσούτσος,Θ., 1997. Εισαγωγή στο Φυσικό και
 Ανθρωπογενές Περιβάλλον , εκδόσεις Ελληνικό
 Ανοιχτό Πανεπιστήμιο , Πάτρα
 Μαρτζόπουλος, Γ. , 2008. Ανανεώσιμες Πηγές
 Ενέργειας , εκδόσεις Τμήμα Εκδόσεων ,
 Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο , Θεσσαλονίκη
 Παπαναγιώτου,Ε. ,2003. Γεωργική Μακροοικονομία
 και Συγκριτική Ανάλυση Γεωργίας, Εκδόσεις
 Γράφημα, Θεσσαλονίκη

Πηγές Διαδικτύου:
 Ν3851/10 ΦΕΚ85Α :

http://www.rae.gr/old/SUB2/2_4.htm#N.3851/10
 Οδηγία 2009/28/Ε.Κ :
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:el:PDF>
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=446>
 ΕΜΥ 2010:
http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_region_diagrams_html?dr_city=Thessaloniki_Mikra
 Λογισμικό Sunny Design:
<http://www.sma-hellas.com/el/proionta/logismiko/sunny-design.html>

Νικόλαος Κατσούλας¹, Κωνσταντίνος Αποστόλου², Μαριάνθη Χατζηϊωάννου², Σταυρούλα Αϊφαντή²,
Χρήστος Νεοφύτου², Κωνσταντίνος Κίττας¹

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ¹Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παρ/γής και Αγρ. Περιβάλλοντος, ²Τμήμα Γεωπονίας
Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος

Η εκτροφή σαλιγκαριών έχει μεγάλη οικονομική σημασία αλλά για την ανάπτυξη των σαλιγκαριών απαιτούνται συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας στο περιβάλλον εκτροφής τους. Έτσι, για την ταχύτερη πάχυνση των σαλιγκαριών απαιτείται ένα ήπιο κλίμα με θερμοκρασία αέρα μεταξύ 20°C και 25°C και σχετική υγρασία αέρα μεταξύ 75% και 95%, ενώ παράλληλα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πρέπει να είναι χαμηλή. Τα παραπάνω επίπεδα συνθηκών δεν μπορούν να επιτευχθούν στον ανοιχτό αγρό στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδος. Παρόλα αυτά, οι παραπάνω συνθήκες θα μπορούσαν να επιτευχθούν για μεγάλο διάστημα του έτους σε κατασκευές διχτυοκηπίων με ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας του αέρα. Για το σκοπό αυτό, στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Εργαστήριο Ιχθυολογίας – Υδροβιολογίας) κατασκευάστηκε διχτυοκήπιο έκτασης 360 m². Στο διχτυοκήπιο εγκαταστάθηκαν δύο συστήματα ελέγχου της σχετικής υγρασίας του αέρα, ένα χαμηλής (6 atm) και ένα υψηλής πίεσης (50 atm) και έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με τη βοήθεια των συστημάτων αυτών η θερμοκρασία μπορούσε να παραμείνει στο διχτυοκήπιο σε επίπεδα χαμηλότερα των 25°C, ακόμα και όταν στο εξωτερικό περιβάλλον επικρατούσαν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C. Παράλληλα, τα συστήματα που εγκαταστάθηκαν ήταν δυνατό να διατηρήσουν στο χώρο του διχτυοκηπίου σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 80%-85%.

Λέξεις κλειδιά: σαλιγκαροτροφία, ψύξη με εξάτμιση, σχετική υγρασία, θερμοκρασία, σκίαση

DESIGN AND PERFORMANCE TEST OF A FOG COOLING SYSTEM FOR HUMIDITY CONTROL IN SCREENHOUSES FOR SNAIL BREEDING

Nikolaos Katsoulas¹, Konstantinos Apostolou², Marianthi Xatzioannou², Stavroula Aifanti², Christos
Neofytou², Constantinos Kittas¹

University of Thessaly, ¹Dept of Agriculture Crop Production and Rural Environment, ²Dept of Ichthyology and
Aquatic Environment, Fytokou Str, 38446, Volos

Breeding of snails has great economic importance but for snail development specific levels of temperature and relative humidity, solar radiation are necessary. For faster fattening of snails a mild climate with air temperature between 20°C and 25°C and air relative humidity between 75% and 95% is required, while the intensity of solar radiation should be very low. The above conditions can not be achieved under open field conditions in most parts of Greece. However, these conditions could be achieved for most of the year in screenhouses with controlled air humidity conditions. For this purpose, in the premises of the Department of Ichthyology and Aquatic Environment, University of Thessaly (Laboratory of Ichthyology - Hydrobiology) a screenhouse of 360 m² was built equipped with two systems for air relative humidity control, a low (6atm) and a high (50 atm) pressure. Air temperature and relative humidity and solar radiation measurements were carried out inside and outside the screenhouses in order to characterise and evaluate the efficiency of the above systems to control the screenhouse temperature and humidity environment. It was found that the installed systems were able to maintain a screenhouse air temperature lower than 25°C and a humidity level lower higher than 85% even when the outside air temperature was higher than 30°C.

Keywords: evaporative cooling, relative humidity, temperature, shading

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σαλιγκάρι αποτελεί τρόφιμο το οποίο καταναλώνεται από εκατομμύρια ανθρώπους σε ολόκληρο τον κόσμο (Jess & Marks 1998, Murphy 2001, Milinsk et al. 2006). Οι πιο σημαντικοί καταναλωτές του είναι οι κάτοικοι της Ευρώπης, με κυριότερη τη Γαλλία (Ogozul et al. 2005). Η εκτροφή σαλιγκαριών, έχει μεγάλη οικονομική σημασία και απαιτεί μια αξιόλογη επένδυση σε χρόνο, εξοπλισμό, και πόρους (Begg & Mcinness 2003).

Ο ρυθμός αύξησης του βάρους των σαλιγκαριών εξαρτάται, πέρα από την πυκνότητα του πληθυσμού και το σιτηρέσιο, κυρίως από τις κλιματικές

συνθήκες (θερμοκρασία – υγρασία - ακτινοβολία). Για την πάχυνση των σαλιγκαριών απαιτείται ένα ήπιο κλίμα με μέτρια θερμοκρασία (20-25°C) σε συνδυασμό με υψηλή υγρασία (75-95%) (Murphy 2001), αν και τα περισσότερα είδη μπορούν να διαβιώσουν σε ένα ευρύτερο φάσμα θερμοκρασιών (5-30°C) (Bailey 1981, Iglesias et al. 1996). Όταν η θερμοκρασία μειώνεται στους 5°C, τα σαλιγκάρια περνούν σε χειμέρια νάρκη, ενώ μεταξύ 5°C έως 15°C, περιορίζεται πολύ η ανάπτυξή τους. Σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής ατμοσφαιρικής υγρασίας, σφραγίζουν το στόμιο του κελύφους με μια μεμβράνη, το επίφραγμα και

περνούν σε κατάσταση διάπαυσης (θερινή νάρκη) όπου και σταματούν να αναπτύσσονται.

Στη Γαλλία, στην Ιταλία, στην Ισπανία, αλλά και στην Αυστραλία έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι εκτατικής και εντατικής εκτροφής σαλιγκαριών (Elmslie 1989, Igglestias et al. 1996, Begg & Mcinness 2003). Τα κυριότερα συστήματα εκτροφής είναι τρία: (α) ανοιχτού τύπου ή μη ελεγχόμενη, (β) κλειστού τύπου ή πλήρως ελεγχόμενη και (γ) μεικτού τύπου. Ο ανοιχτός τύπος εκτροφής, ή ιταλικού τύπου, είναι ο πιο παλιός και γίνεται στον ανοιχτό αγρό με πολύ μικρές απαιτήσεις σε εγκαταστάσεις και εξοπλισμό για την εκτροφή. Στην περίπτωση αυτή ο κύκλος παραγωγής διαρκεί 18 έως 24 μήνες, καθώς δεν υπάρχει καμία δυνατότητα ελέγχου του περιβάλλοντος ανάπτυξης των ζώων. Όμως, η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή σχετική υγρασία στα ανοιχτά εκτροφεία, συνθήκες οι οποίες εμφανίζονται στην Ελλάδα, κυρίως από τον Απρίλιο και μετά, μπορεί να προκαλέσει την πλήρη παύση των δραστηριοτήτων των ζώων (Attia 2004).

Στα εκτροφεία κλειστού τύπου ο πληθυσμός των σαλιγκαριών είναι προστατευμένος από θηρευτές και η παραγωγή είναι σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τα εκτροφεία ανοικτού τύπου.

Το μειονέκτημα της κλειστού τύπου εκτροφής, είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, που την καθιστά οικονομικά ασύμφορη (Λαζαρίδου-Δημητριάδου & Κάππουλας 1985).

Ο μεικτός τύπος εκτροφής έχει στοιχεία από τους δύο προηγούμενους τύπους (τον ανοιχτό και τον κλειστό τύπο) και είναι οικονομικά βιώσιμος (Issari et al., 2011). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα σαλιγκάρια μπορούν να γεννηθούν και να εκκολαφθούν μέσα σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον και στη συνέχεια να μεταφερθούν σε διχτυοκήπια για την πάχυνση.

Παρόλα αυτά, τα διχτυοκήπια που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα στη χώρα μας για την πάχυνση των σαλιγκαριών δε διαθέτουν συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα και έτσι δεν είναι δυνατή η χρήση τους καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου όπου επικρατούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 15°C.

Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να είναι αυτό της ψύξης με εξάτμιση, με ψεκασμό νερού στο χώρο του διχτυοκηπίου σε υψηλή ή χαμηλή πίεση. Τα συστήματα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη έχουν δοκιμασθεί και λειτουργούν με επιτυχία για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας των θερμοκηπίων (Arbel et al. 1999, Katsoulas et al. 2011, 2007).

Έτσι, στόχος της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα των διχτυοκηπίων και η δοκιμή του σε πραγματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Το διχτυοκήπιο

Το διχτυοκήπιο κατασκευάστηκε από μεταλλικό σκελετό σχήματος τροποποιημένου τοξωτού και

αποτελούνταν από δύο ενωμένα κατά μήκος μεταξύ τους τμήματα μήκους 22.5 m και πλάτους 8 m. Έτσι, η συνολική καλυμμένη έκταση του εδάφους ήταν 360 m². Το ύψος διχτυοκηπίου στην υδρορροή ήταν 3.2 m και το ύψος της κορυφής είναι 4.2 m.

Η κάλυψη πραγματοποιήθηκε με δίχτυ σκίασης μαύρου χρώματος από πολυπροπυλένιο, με ποσοστό σκίασης μεγαλύτερο από 90%. Περιμετρικά του διχτυοκηπίου και μέχρι ύψος 0.9m τοποθετήθηκε λαμαρίνα (βάθος 0.2 m) για την αποτροπή εισόδου τρωκτικών και ερπετών, τα οποία είναι εχθροί των σαλιγκαριών.

Για τον έλεγχο της υγρασίας του αέρα στο χώρο του διχτυοκηπίου εγκαταστάθηκαν δύο συστήματα: α) Σύστημα χαμηλής (6 atm) πίεσης και β) σύστημα υψηλής (50 atm) πίεσης.

Το σύστημα υψηλής πίεσης λειτουργεί σε πίεση 50 atm και δημιουργεί σταγόνες διαμέτρου 40-50 μm οι οποίες, λόγω του χαμηλού βάρους τους, παραμένουν στον αέρα και εξατμίζονται πριν πέσουν στο έδαφος. Σε αντίθεση, το σύστημα χαμηλής πίεσης λειτουργεί σε πίεση 5 atm και δημιουργεί σταγόνες μεγαλύτερης διαμέτρου (> 200 μm) οι οποίες, λόγω του μεγάλου βάρους τους, πέφτουν στο έδαφος πριν προλάβουν πλήρως να εξατμισθούν.

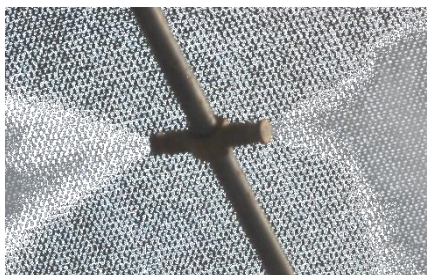
Το σύστημα χαμηλής πίεσης αποτελούνταν από αντλία και πιεστικό νερού το οποίο διατηρεί την πίεση στο δίκτυο μεταξύ 4-6 atm. Το νερό διοχετεύονταν από την αντλία στα μπεκ με σύστημα σωληνώσεων αντοχής πίεσης τουλάχιστον 6 atm. Τα μπεκ είχαν παροχή 5.5 L h⁻¹ το καθένα και τοποθετήθηκαν σε τετράδα (Σχήμα 1). Σε κάθε μονάδα πλάτους 8 m του διχτυοκηπίου ήταν τοποθετημένες δύο γραμμές μπεκ. Οι τετράδες των μπεκ ήταν τοποθετημένες ανά 1.5 m κατά μήκος της κάθε γραμμής. Έτσι, στο υπό μελέτη διχτυοκήπιο τοποθετήθηκαν 60 τετράδες, δηλαδή 240 μπεκ συνολικά (περίπου 170 τετράδες ανά στρέμμα), με μέση παροχή του συστήματος για το διχτυοκήπιο 3.667 L m⁻² h⁻¹. Το σύστημα λειτουργούσε κατά το διάστημα 10:00 – 19:00 για 2 δευτερόλεπτα κάθε λεπτό. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο λειτουργίας του συστήματος, η μέγιστη ημερήσια κατανάλωση νερού ήταν 1.1 L m⁻².



Σχήμα 1. Άποψη της τετράδας των μπεκ του συστήματος χαμηλής πίεσης.

Το σύστημα υψηλής πίεσης αποτελούνταν από αντλία η οποία διατηρούσε την πίεση στο δίκτυο μεταξύ 40-60 atm. Το νερό διοχετεύονταν από την αντλία στα μπεκ με σύστημα ανοξείδωτων σωληνώσεων αντοχής σε πίεση τουλάχιστον 100 atm. Τα μπεκ είχαν παροχή 4 L h⁻¹. Σε κάθε μονάδα πλάτους 8 m είχε εγκατασταθεί μία γραμμή με 2 μπεκ

(Σχήμα 2) για κάθε 1.5 m μήκους σωλήνα (περίπου 250 μπεκ ανά στρέμμα) με μέση παροχή του συστήματος για το διχτυοκήπιο $0.622 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Το σύστημα λειτουργούσε με βάση ηλεκτρονικό αισθητήρα σχετικής υγρασίας και ενεργοποιούνταν κατά το διάστημα 9:00 – 21:00 για 55 δευτερόλεπτα κάθε λεπτό, όταν η σχετική υγρασία του αέρα ήταν μικρότερη από 90%. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο λειτουργίας του συστήματος, η μέγιστη ημερήσια κατανάλωση νερού ήταν 5.7 L m^{-2} .



Σχήμα 2. Αποψη των μπεκ του συστήματος υψηλής πίεσης.

2.2 Μετρήσεις

Προκειμένου να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα των δύο συστημάτων στον έλεγχο του μικροκλίματος του διχτυοκηπίου, εγκαταστάθηκαν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί, ένας εσωτερικά και ένας εξωτερικά του διχτυοκηπίου και έγιναν μετρήσεις κατά το διάστημα του καλοκαιριού του 2011. Μέσα στο διχτυοκήπιο μετρούνταν η θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα με τη βοήθεια αισθητήρων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Hobo Microstation, model H21-002, OnSet Instruments, Bourne, MA, USA), καθώς και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με τη βοήθεια πυρανομέτρου (Decagon, USA). Έξω από το διχτυοκήπιο μετρούνταν, εκτός των παραπάνω, η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου (Thies Clima, Germany). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 10 λεπτά και η μέση τιμή ανά 10 λεπτά καταγραφόταν σε καταγραφικό δεδομένων.

Τέλος, με τη βοήθεια υδρομέτρου γινόνταν η καταγραφή της παροχής νερού στα δύο συστήματα δροσίσιμου του θερμοκηπίου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Προκειμένου να βρεθεί η επίδραση των συστημάτων δροσίσιμου στο μικροκλίμα του διχτυοκηπίου, στα αποτελέσματα συγκρίνονται ημέρες με ή χωρίς τα συστήματα δροσίσιμου σε λειτουργία. Έτσι, παρουσιάζονται αποτελέσματα 2 χαρακτηριστικών ημερών της περιόδου, μιας ημέρας χωρίς τα συστήματα δροσίσιμου σε λειτουργία (15 Αυγούστου) και μιας ημέρας με τα συστήματα δροσίσιμου σε λειτουργία (9 Αυγούστου). Οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των δύο παραπάνω ημερών ήταν παρόμοιες, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Το δίκτυ που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη του διχτυοκηπίου μείωσε την είσοδο της ακτινοβολίας σε μεγάλο βαθμό καθώς ο συντελεστής διαπερατότητας του διχτυοκηπίου στην ηλιακή

ακτινοβολία, ο οποίος υπολογίστηκε από το λόγο της εισερχόμενης (Πίνακας 2) προς την προσπίπτουσα (Πίνακας 1) ακτινοβολία, ήταν της τάξης του 5.5%.

Πίνακας 1. Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων έξω από το διχτυοκήπιο κατά το διάστημα 9:00 – 21:00 των δύο χαρακτηριστικών ημερών.

	T °C	RH %	SR $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	WS m s^{-1}
9 Αυγ	31.2	49	24.58	1.9
15 Αυγ	30.8	42	22.91	2.0

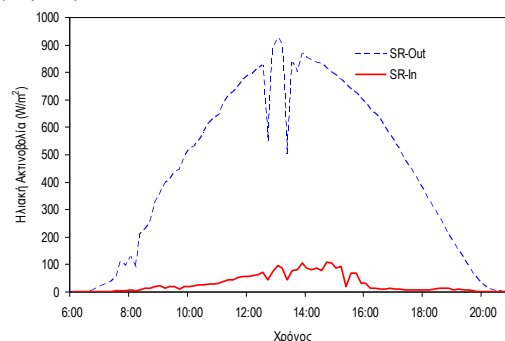
T: θερμοκρασία αέρα, RH: σχετική υγρασία αέρα, SR: ηλιακή ακτινοβολία

Πίνακας 2. Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου κατά το διάστημα 9:00 – 21:00 των δύο χαρακτηριστικών ημερών με (9 Αυγούστου) ή χωρίς (15 Αυγούστου) δροσίσιμό.

	T °C	RH %	SR $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
9 Αυγ	25.6	91	1.74
15 Αυγ	30.9	43	1.49

T: θερμοκρασία αέρα, RH: σχετική υγρασία αέρα, SR: ηλιακή ακτινοβολία

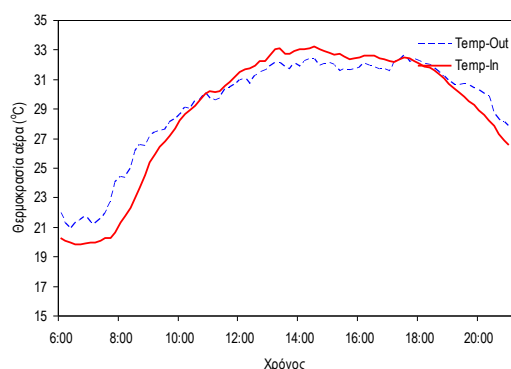
Η πορεία των τιμών της εισερχόμενης και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά το διάστημα μιας ημέρας (15 Αυγούστου 2011) της περιόδου των μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Οι απότομες διακυμάνσεις στις τιμές της εισερχόμενης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου η εξωτερική ακτινοβολία ήταν ομαλή, οφείλονται στις σκιάσεις που προκαλούνται στον αισθητήρα ακτινοβολίας από το σκελετό του διχτυοκηπίου. Φαίνεται ότι ενώ η ηλιακή ακτινοβολία έξω από το διχτυοκήπιο λάμβανε τιμές κοντά στα 900 W m^{-2} κατά το διάστημα του μεσημεριού, στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου το ίδιο χρονικό διάστημα η ηλιακή ακτινοβολία δεν ξεπερνούσε τα 100 W m^{-2} . Οι τιμές αυτές της ακτινοβολίας μπορούν να θεωρηθούν κοντά στις ιδανικές τιμές για τα σαλιγκάρια, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας συννεφιασμένης ημέρας κυμαίνεται σε επίπεδα μικρότερα των 100 W m^{-2} .



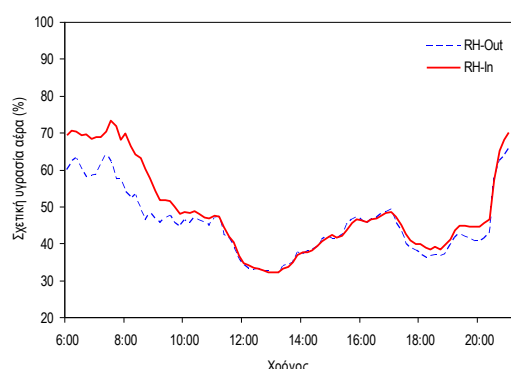
Σχήμα 1. Ημερήσια πορεία των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (15 Αυγούστου 2011).

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου, κατά τη διάρκεια της περιόδου όπου το σύστημα δροσίσιμου δεν ήταν σε λειτουργία, ήταν παρόμοια ή

μεγαλύτερη από αυτή του εξωτερικού αέρα (Σχήμα 2). Όπως προκύπτει από τους Πίνακες 1 και 2, στις 15 Αυγούστου, ημέρα κατά την οποία δεν λειτουργούσαν τα συστήματα δροσισμού, η μέση τιμή της θερμοκρασίας έξω από το διχτυοκήπιο ήταν 30.8°C ενώ μέσα στο διχτυοκήπιο ήταν 30.9°C. Παράλληλα, οι αντίστοιχες τιμές της σχετικής υγρασίας του αέρα ήταν 42% και 43% αντίστοιχα, με τις ελάχιστες τιμές σε επίπεδα κοντά στο 30% να παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του μεσημεριού (Σχήμα 3).



Σχήμα 2. Ημερήσια πορεία των τιμών της θερμοκρασίας μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (15 Αυγούστου 2011) όπου δεν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.

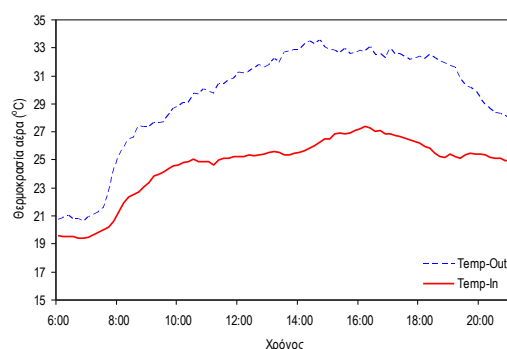


Σχήμα 3. Ημερήσια πορεία των τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (15 Αυγούστου 2011) όπου δεν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.

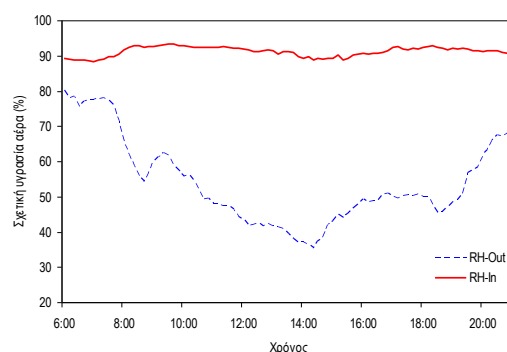
Η χρήση των συστημάτων δροσισμού οδήγησε σε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου σε σχέση με την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου μειώθηκε κατά 5.7 °C κατά τη διάρκεια της 9ης Αυγούστου (Πίνακες 1 και 2). Η τιμή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου δεν ξεπερνούσε τους 25°C κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας, ακόμα και όταν η θερμοκρασία έξω από το διχτυοκήπιο πλησίαζε στους 33°C (Σχήμα 4).

Η σχετική υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου, όταν λειτουργούσε το σύστημα

δροσισμού, διατηρήθηκε σε επίπεδα μεγαλύτερα του 85-90% καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 5).



Σχήμα 4. Ημερήσια πορεία των τιμών της θερμοκρασίας μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (9 Αυγούστου 2011) όπου λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.



Σχήμα 5. Ημερήσια πορεία των τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από το διχτυοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας (9 Αυγούστου 2011) όπου λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.

Για την επίτευξη των παραπάνω συνθηκών χρειάστηκε να ψεκαστούν 3.45 L νερού ανά m² εδάφους στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς, καθώς η μέγιστη ημερήσια κατανάλωση νερού, αν το σύστημα λειτουργούσε πλήρως καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, θα μπορούσε να είναι της τάξης του 5.7 L m⁻², φαίνεται ότι το σύστημα ήταν δυνατό να επιτύχει τις επιθυμητές συνθήκες χωρίς να λειτουργεί συνεχώς.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, με την βοήθεια των συστημάτων δροσισμού που εγκαταστάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του διχτυοκηπίου μπορούσε να παραμείνει στο διχτυοκήπιο σε επίπεδα χαμηλότερα των 25°C ακόμα και όταν στο εξωτερικό περιβάλλον επικρατούσαν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C. Παράλληλα, τα συστήματα που εγκαταστάθηκαν ήταν δυνατό να διατηρήσουν στο χώρο του διχτυοκηπίου σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 80%-

85% εξασφαλίζοντας έτσι άριστες συνθήκες για την πάχυνση των σαλιγκαριών.

Βιβλιογραφία

- Arbel, A., Yekutieli, O., Barak, M., 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouse. J. Agr. Eng. Res., 72: 129-136.
- Attia, J., 2004. Behavioural rhythms of land snails in the field. Biolog. Rhythm Res., 35: 35-41.
- Bailey, S.E.R., 1981. Circannual and circadian rhythms in the snail *Helix aspersa* Müller and the photoperiodic control of annual activity and reproduction. J. Compar. Physiol., 142: 89-94.
- Begg, S., McInness, P., 2003. Farming edible snails - Lessons from Italy. Publication No. 03/137, Printed by Union Offset Printing, Canberra, Australia: 1-13.
- Iglesias, J., Santos, M., Castillejo, J., 1996. Annual activity cycles of the land snail *Helix aspersa* (Müller) in natural populations in North-Western Spain. J. Molluscan Stud., 62: 495-505.
- Issari, A., Hatzioannou, M., Neofitou, C., Aifanti, S., Matsiori, S., 2011. Economic viability study of *Helix aspersa* farms. 4th Int. Symposium on Hydrobiology and Fisheries, Volos, 9-11 June 2011.
- Jess, S., Marks, R.J., 1998. Effect of temperature and photoperiod on growth and reproduction of *Helix aspersa* var. maxima. The J. Agric. Sci., 130: 367-372.
- Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C., 2001. Effect of air misting on transpiration and bulk conductances of a greenhouse rose canopy. Agric. For. Meteorol., 106(3): 233-247.
- Katsoulas, N., Kittas, C., Tsirogiannis, I. L., Kitta, E., Savvas D., 2007. Greenhouse microclimate and soilless pepper crop production and quality as affected by a fog evaporative cooling system. Trans. ASABE, 50(5): 1831-1840.
- Milinsk, M.C., Padrea, R.G., Hayashib, C., Oliveiraa C.C., Visentainera, J.V., Evelazio de Souzaa, N., Matsushita, M., 2006. Effects of feed protein and lipid contents on fatty acid profile of snail (*Helix aspersa maxima*) meat. J. Food Compos. Anal., 19: 212-216.
- Murphy, B., 2001. Breeding and growing snails commercially in Australia. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No. 00-188. <http://www.rirdc.gov.au/reports/NAP/00-188.htm>.
- Ozogul, Y., Ozogul, F., Ilkan Olgunoglu, A., 2005. Fatty acid profile and mineral content of the wild snail (*Helix pomatia*) from the region of the south of the Turkey. Europ. Food Res. Technol., 221: 547-549.
- Λαζαρίδου-Δημητριάδου, Μ., Κάπτουλας, Μ.Ε., 1985. Τα εδώδιμα και εμπορεύσιμα σαλιγκάρια της Ελλάδας – Σαλιγκαροτροφία. Γιαχούδη-Γιαπούλη Ο.Ε., Θεσσαλονίκη, σελ. 60 – 65.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΣΡΟΩΝ – ΕΚΡΟΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Γ. Δασκαλάκη¹, Ν. Κατσούλας², Γ. Βλόντζος², Ι. Λιβιεράτος¹, Μ. Tchamitchian⁴, Κ. Κίττας²

¹Τμήμα Αειφόρου Γεωργίας, Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων, Μακεδονίας Στ. 1, 73100, Χανιά, Κρήτη

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγρ. Περιβ., οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος

³INRA, Avignon, France

Στην θερμοκηπιακή παραγωγή σημαντικό στόχο αποτελεί τόσο ο περιορισμός των εισροών όσο και η αποτελεσματικότερη χρήση τους με σκοπό την βελτιστοποίηση του κέρδους των επιχειρήσεων. Εισροές μπορεί να είναι οποιοδήποτε αγαθό ή υπηρεσία χρησιμοποιείται για την παραγωγή του προϊόντος όπως εργασία, μηχανήματα, κτίρια, πρώτες ύλες, ενέργεια κλπ. Τα θερμοκήπια, ανάλογα με την κατασκευή, τον εξοπλισμό, την καλλιέργεια, την διαχείριση και την περιοχή στην οποία βρίσκονται έχουν διαφορετικές εισροές και αποτελεσματικότητα χρήσης. Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι εισροές και οι εκροές σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες περιοχών της Κρήτης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από ερωτηματολόγια και αναλύθηκαν με τις μεθόδους ανάλυσης των ενεργειακών εισροών και εκροών (Input-Output energy analysis) και περιβάλλουσας ανάλυσης δεδομένων (Data Envelopment Analysis). Για την μελέτη αυτή εξετάστηκαν θερμοκήπια με διάφορους συνδυασμούς λαχανοκομικών καλλιεργειών. Βρέθηκε ότι ο συνδυασμός των καλλιεργειών τομάτας και πιπεριάς σε μία επιχείρηση έχει την υψηλότερη αποτελεσματικότητα χρήσης ενέργειας και τις χαμηλότερες ενεργειακές εισροές ανά κιλό προϊόντος. Το υψηλότερο μερίδιο ανάμεσα στις εισροές κατείχαν τα λιπάσματα και ακολουθούσαν τα καύσιμα και η ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, σε σχέση με την οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, βρέθηκε ότι η πλειοψηφία των εκμεταλλεύσεων που μελετήθηκαν ήταν αποδοτικότερες με τον μέσο όρο των αποδόσεων κλίμακας να κυμαίνεται στο 80%, γεγονός που δείχνει ότι οι συνολικές εισροές σε ευρώ θα μπορούσαν να περιοριστούν αρκετά χωρίς να μειωθεί η συνολική απόδοση. Το μεγαλύτερο μερίδιο εισροών σε σχέση με το κόστος κατείχαν τα έξοδα για εργατικό προσωπικό ενώ ακολουθούσαν τα έξοδα για λιπάσματα και φυτοπροστασία.

Λέξεις κλειδιά: Εισροές – εκροές ενέργειας, Περιβάλλουσα ανάλυση δεδομένων, αποτελεσματικότητα χρήσης ενέργειας, ερωτηματολόγιο, τεχνολογική αποτελεσματικότητα

INPUT – OUTPUT ENERGY ANALYSIS IN GREENHOUSES. CASE STUDY FOR THE REGION OF CRETE

G. Daskalaki¹, N Katsoulas², G. Vlontzos², I. Livieratos¹, M. Tchamitchian³, C. Kittas²

¹Mediterranean Agronomic Institute of Chania, Makedonias Str. 1, 73100, Chania, Crete

²University of Thessaly, Dept of Agriculture Crop Production and Rural Env., Fytokou Str, 38446, Volos

³INRA, Avignon, France

This study examines the relation between inputs and yield regarding energy quantities and financial data, in greenhouse vegetable crops on the island of Crete, Greece. The data used were collected from growers using a face to face questionnaire. Two methods were applied for data analysis: the Energy Input-Output Analysis and the Data Envelopment Analysis. Regarding energy analysis, four crop combination cases were examined: tomato-pepper, tomato-pepper-cucumber, pepper-eggplant and tomato-cucumber. The results also showed that fertilizers (53%), diesel fuel (16%) and electricity (12%) consumed the bulk of energy. The results implied that the tomato-pepper case was the most efficient and profitable. Regarding the DEA approach, 13 producers of greenhouse vegetable crops were questioned regarding the economic input – output of their farm. Highest inputs included labour (30%), fertilizers (22%) and crop protection (16%). Based on the DEA approach, the average values of technical efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency were 0.9, 0.97 and 0.80, respectively. Recommendations for input reduction without compromising total yield are provided.

Keywords: Energy Input-Output Analysis, Data Envelopment Analysis, energy use efficiency, technical efficiency, questionnaire

1. INTRODUCTION

Greenhouse crop production is an important economic sector in Crete and it highly contributes to the gross domestic product of the region. The greenhouse covered areas in Crete (about 2400 ha) account for about 40% of the total covered areas in Greece (<http://www.statistics.gr>, data from 2007). Tomato, cucumber, pepper and eggplant are dominant in greenhouse production, with the share of more than 95% in the total protected area in Crete. Among the four crops, tomato production takes the

biggest share, of about 50%, cucumber about 25% and pepper and eggplants the rest of the part.

Vegetable production is mostly carried out as a family business involving low levels of technological advances and productivity compared to other regions of Greece or other countries.

The performance efficiency of a system could be evaluated by the Input – Output Energy Analysis method, where all inputs and outputs of the systems are expressed in energy equivalent and relative performance ratios of input to output energy are

calculated, or using the Data Envelopment Analysis (DEA) which identifies a frontier on which the relative performance of all utilities in the system can be compared. In fact, DEA benchmarks the different cases only against the best growers and assumes that if a farm can produce a certain level of output utilizing specific input levels, another farm of equal scale should be capable of doing the same.

Many surveys have used the above methods to analyse the efficiency of greenhouses (Ozkan et al. 2004, Canakci and Akinci 2006, Hatirli et al. 2006, Mohammadi and Omid 2010, Heidari and Omid 2011, Ozkan et al. 2011). An investigation in Antalya region of Turkey (Ozkan et al. 2004) described the level of energy use in four different greenhouse crops, tomato, cucumber, pepper and eggplant for both plastic and glass constructions. The authors reported that cucumber production was the most energy intensive, followed by tomato, eggplant, and pepper crops. However, the highest output-input ratio was found in tomato crop. Thus, a high use of inputs is not always accompanied by a yield increase.

Using the DEA method, Canakci and Akinci (2006) showed that tomato cultivation was the most profitable compared to cucumber, eggplant and pepper crops. Pahlavan et al. (2011, 2012) mentioned that in the case studies that they examined in Iran, about 25% and 44% of the energy inputs could be saved without reducing the crop yield in tomato and rose crops, respectively.

Thus, while growers try to find new ways to increase the level of production and commonly use more inputs, a question arises as to what extend their investment or use of inputs increases their farm energy efficiency. Thus, the aim of this work was to evaluate the performance of different greenhouse farms in Crete using two different data analysis methods, the Energy input–output analysis and the Data Envelopment Analysis.

2. MATERIALS AND METHODS

For the needs of this survey, data were collected from greenhouse growers around Crete (Kountoura area, Timpaki and Gouves area, Ierapetra area) applying a face-to-face questionnaire for the collection of data. Information on the technological level of the greenhouse and its equipment, management strategies and inputs/outputs were recorded.

Regarding the energy analysis, growers with different crop combination cases were examined, that means a grower had several greenhouses with different crops in each greenhouse: (i) case 1: tomato-pepper, (ii) case 2: tomato-pepper-cucumber, (iii) case 3: pepper-eggplant and (iv) case 4: tomato-cucumber. Unfortunately the growers commonly did not keep detailed records of the inputs used per crop imposing the analysis of combinations instead of single crops.

For the needs of the DEA approach, 13 producers of greenhouse vegetable crops were

questioned regarding the economic input –output of their farm.

2.1. Input-output energy analysis

In order to estimate the quantities of energy, energy equivalents of inputs and outputs were converted into equivalent energy units as suggested by Canakci and Akinci (2006) and Hatirli et al (2006). Based on the energy equivalents, the following ratios were calculated:

Energy Use Efficiency = energy output (MJ ha⁻¹) to energy input (MJ ha⁻¹)

Energy Productivity = crop production (kg ha⁻¹) to energy input (MJ ha⁻¹)

Specific Energy (MJ kg⁻¹) = energy input per unit of product

Net Energy (MJ ha⁻¹) = output - input energy.

The energy demand can be divided into direct and indirect energy or renewable and non-renewable energy (Mandal et al. 2006). Direct energy covers human labour, water, diesel and electricity, while indirect energy includes energy embodied in fertilizers, manure, chemicals, plants and machinery used during the production process.

2.2. Data Envelopment Analysis

DEA is based on a finite sample of observed production units, which uses a linear programming method and does not need to estimate a pre-established functional form (Vlontzos 2013). It follows the Farrell approach (Farrell 1957) as proposed by Charnes et al. (1978). The advantage of DEA is its flexibility and the possibility of using it for different farm types and scenario analysis. The possibility to calculate technical efficiency over time makes the analysis of farm efficiency changes over a period possible.

There are two kinds of DEA models included: CCR built on the assumption of constant returns to scale (CRS) and BCC models built on the assumption of variable returns to scale (VRS) of activities. In DEA, the efficiency is defined in three different forms: overall technical efficiency (TE), pure technical efficiency (PTE) and scale efficiency (SE). Technical Efficiency (TE) is defined as the achievement of the maximum potential output from given amounts of inputs, taking into account physical production relationships. It can be measured within two main frameworks. First is the input-oriented framework where technical efficiency gives the potential input reduction that a farm could apply without reducing its output level; on the other hand, there is the output-oriented framework where technical efficiency gives information about the potential output increase that a farm could apply without increasing its use of inputs.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Input – Output Energy Analysis

From the energy input distribution of all cases (Fig. 1), nitrogen, oil and electricity have the biggest shares. That means that the majority of the energy used for these crops was consumed on nitrogen fertilizers, oil for heating and electricity for a variety of purposes. Due to the low level of mechanization, human power represents a high percentage of total inputs. At the other end with a percentage lower than 5%, phosphorous fertilizers, plant material and energy for water purposes follow.

It is noteworthy that diesel engages a big share among the inputs, reflecting a rather limited usage of heating by a few growers.

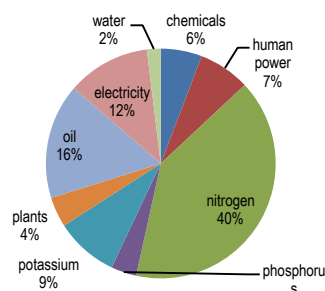


Fig. 1. Input distribution in greenhouses in Crete expressed in energy.

Regarding production yield (kg/ha) tomato-cucumber crops had the highest, followed by tomato-pepper-cucumber-tomato-pepper and pepper-eggplant. The yield according to energy (MJ/ha) and the total inputs of each case follow the same rank. Table 1 provides the calculated energy ratios for each group of crops.

Table 1. Calculated energy ratios for the different cases studied.

	Case1	Case2	Case3	Case4
Energy use efficiency (MJ/MJ)	1.46	1.20	1.27	1.15
Energy productivity (kg/MJ)	1.83	1.50	1.59	1.43
Energy Input per kg of product (MJ/kg)	0.55	0.67	0.63	0.70
Net energy (energy output-energy input)	43523	22927	21918	21534

case 1: tomato-pepper; case 2: tomato-pepper-cucumber; case 3: pepper-eggplant; case 4: tomato-cucumber.

The energy use efficiency was the highest for tomato-pepper, followed by pepper-eggplant, tomato-pepper-cucumber and tomato-cucumber. Energy productivity and energy input per kg of product followed the same rank. The net energy was the highest for tomato-pepper, followed by tomato-pepper-cucumber, pepper-eggplant and finally tomato-cucumber. Thus, tomato-pepper production has the highest use efficiency, the highest productivity, the lowest energy input per kg of product and the highest net energy. As a result, it represents the most profitable combination of the four cases. Also, it is implied that an intensive use of inputs is not

always accompanied by an increase in the final product.

The production of tomato-pepper has a higher efficiency, followed by pepper-eggplant, tomato-pepper-cucumber and tomato-cucumber. Pepper-eggplant production had a lower quantity of total inputs in comparison to tomato-cucumber.

Regarding the types of energy, direct energy occupied 37% of total energy and indirect 63%. Renewable energy covered 11% of the total energy whereas non-renewable occupied 89%.

3.2 Data Envelopment Analysis

Figure 2 shows the cost distribution of inputs in the greenhouses studied. The highest percentage concerns labour with 30% of total costs. The majority of the producers have greenhouse constructions as a family business, but as greenhouse production is an intensive one, the grower needs more workers during a season. They usually have 2-3 permanent workers and usually hire some seasonal workers during sprayings and harvesting. A worker works all day and the work that he has to do is labor-intensive, so the salary is high as reflected by the total rates of labor costs. Next, follow the cost of fertilizers and crop protection with 22 and 16%, respectively. Oil has the last position at 3%, as Crete usually has high temperatures during winter months and a heating system is not necessary. In addition, even when there is a heating system in greenhouse constructions, the high cost of oil during the last years does not allow the growers to use the heating system as frequently as it is required. Some of the crops require higher temperature than others, such as the cucumber.

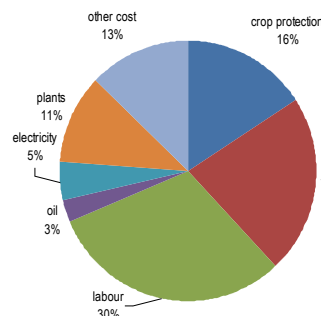


Fig. 2. Input distribution in greenhouses in Crete expressed in cost.

Cucumber is a crop that needs high temperatures (18-30°C) for optimum growth normal development and high yield, whereas other crops like tomato, pepper and eggplant require somewhat lower temperatures. For example temperatures that are required for tomato range from 13.5°C at night to 27°C during the day, for pepper from 18°C to 27°C and for eggplant from 18°C to 28°C, respectively.

Growers choose crops not so vulnerable in high temperatures or hybrids with resistance to low temperatures and try to use the heating system as less as possible to ensure sufficient yield. Electricity

also has a low percentage of 5% of total cost. That happens as the majority of growers do not use high technology equipment, which would need electricity. For example, there are manual windows instead of automatic and electricity is not being used for spraying (as a mean of) crop protection management or other uses.

Based on the CCR results of this study, 9 out of the 13 growers were efficient and the remaining 4 were inefficient in terms of inputs usage. From the BCC model, only one producer was inefficient in input use and the remaining 12 were efficient. These producers could use less input to obtain comparable yield.

The results of DEA application showed that the average values of technical efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency were 0.90, 0.97 and 0.80, respectively. Low scale efficiency indicates that, if growers utilize their inputs efficiently, considerable savings are possible, without any change in technological practices. Consequently, the total input in euros could be significantly reduced without total yield reductions simply by adopting the recommendations based on this method.

The return to scale estimation also provides useful information. The constant returns to scale indicate the proportionate increase in outputs in response to an increase in inputs while, increasing (decreasing) returns to scale imply that an increase in the input resources produces more (less) than a proportionate increase in outputs. Results show that the majority of the greenhouse producers are operating at the optimal scale with a few producers from the total needing to improve their efficiency. The results of the RTS indicated that 70% of the farms appear to be constant, 15% appear to have decreasing returns to scale and the rest appear to have increasing returns to scale.

4. CONCLUSION

The two methods that were applied (Energy Input-Output Analysis and Data Envelopment Analysis) provided useful information regarding the image of greenhouse crops on the island of Crete. Energy input-output analysis showed that the most profitable production case was tomato-pepper with the lowest input per kg of product and the highest energy productivity, energy efficiency and net energy in comparison to the other 3 cases. The highest share in inputs was occupied by fertilizers, in particular nitrogen (40% of total inputs), diesel fuel and electricity. DEA has helped in segregating efficient growers from inefficient and identifying wasteful uses of inputs by inefficient growers. Based on the BCC model, only one out of thirteen producers was inefficient; while based on the CCR model the majority of the producers were efficient. Nine out of thirteen were efficient; two were operating at increasing returns to scale and two at decreasing returns to scale. The total input in euro could be significantly reduced without reducing the total yield from its present level. The highest share of inputs

with respect to cost was in labour, followed by fertilizers and crop protection.

Literature Cited

- Canakci, M., and Akinci, I. 2006. Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy* 31: 1243-56.
- Hatirli, S.A., Ozkan, B., and Fert, C. 2006. Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy* 31: 427-438.
- Heidari, M.D., and Omid, M. 2011. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran. *Energy* 36: 220-25.
- Mandal, K.G., Saha, K.P., Ghosh, P.K., Hati, K.M., and Bandyopadhyay, K.K. 2002. Bioenergy and economic analysis of soybean-based crop production systems in central India. *Biomass Bioenergy* 23: 337-45.
- Mohammadi, A., and Omid, M. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied energy* 87: 191-196.
- Ozkan, B., Ceylan, R.F., and Kizilay, H. 2011. Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production. *Renewable Energy* 36: 3217-2.
- Ozkan, B., Kurklu, A., and Akcaoz, H. 2004. An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. *Biom. Bioenergy* 26: 89-95.
- Pahlavan, R., Omid, M., and Akram, A. 2011. Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. *Energy* 36: 6714-19.
- Pahlavan, R., Omid, M., Rafiee, S., and Mousavi-Avval, S.H. 2012. Optimization of energy consumption for rose production in Iran. *Energy for sustainable development* 16: 236-41.
- Viontzos, G. 2013. Assessment of the efficiency in Greek dairy industry; implementation of Data Envelopment Analysis methodology. *Agricultural Economics Review*, In press. ISSN:1109-2580