ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Φ.Μαρκάκης, Η.Σκαρπέλος & Γρ. Λαμπρινός

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Α.Φ.Π. & Γ.Μ., Ιερά Οδός 75, T.K. 11855, Αθήνα, Τηλ. 210 529 4029–4031, Fax. 210 529 4032, e-mail: refrigenergy@aua.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τη μελέτη της αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας με αισθητή και με αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα καθώς και για την αξιολόγηση διαθέσιμων υλικών αποθήκευσης, κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Μηχ/γίας του Γ.Π.Α. πειραματική εγκατάσταση ηλιακής θέρμανσης και αποθήκευσης με δύο μεθόδους. Με την πρώτη μέθοδο βρέθηκε ότι η μάζα 360 kg ασβεστολιθικής κροκάλας, μπορεί να αποθηκεύσει και να επαναποδώσει θερμική ενέργεια 11,500-13,500 kJ. Με τη δεύτερη μέθοδο βρέθηκε ότι η μάζα 55 kg συνθετικής παραφίνης RT20 σε πλαστικά φιαλίδια του 0.5 L μπορεί να αποθηκεύσει και να επαναποδώσει θερμότητα 11,000-13,000 kJ. Η μικτή αποθήκευση με ασβεστόλιθο και RT20 δεν αποδείχθηκε αποτελεσματική καθώς το θερμικό όφελος περιορίστηκε στα 9,500 kJ μόνο.

Λέζεις κλειδιά: Ηλιακή ενέργεια, Θερμική αποθήκευση, Αποθήκευση με αισθητή θερμότητα, Αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα.

EXPERIMENTAL INSTALLATION OF SOLAR ENERGY STORAGE Markakis F., Skarpelos H., Labrinos G.

Agricultural University of Athens, Dep. of N.R.M. and A.E., Iera Odos 75, 11855, Athens, Tel. 210 529 4035 7 4031, Fax 210 529 4032, e-mail: refrigenergy@aua.gr

ABSTRACT

At Farm Machinery laboratory of A.U.A. an experimental installation of solar heat storage was constructed to study the efficiency of solar energy storage as sensible heat and as sensible and latent heat. The first tested material, 360 kg mass of limestone calcareous pebbles, was found that can provide an energy feedback of 11,500 -13,500 kJ of sensible heat energy. The second tested material, 55 kg mass of synthetic paraffin RT20 packed in plastic bottles of 0.5 L, was found that can provide an energy feedback of 11,000-13,000 kJ of sensible and latent heat energy. A mixed use of the two tested materials (limestone and RT20) for heat storage did not proved equally efficient as the other studied cases because the energy feedback was only up to 9,500 kJ.

Keywords: Solar Energy, Heat Storage, sensible heat storage, Latent heat storage.

1. Εισαγωγή

Έχουν γίνει αρκετές κατασκευές και μελέτες σχετικά με την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας από τον ήλιο και τη μετέπειτα χρησιμοποίηση της για την θέρμανση χώρων (Argiriou, 1997; Ucar and Inalli,2005). Σε πολλές εργασίες έχει γίνει ανάλυση των υλικών αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας με αισθητή θερμότητα όπως χαλίκι, μέταλλα κ.α. (Dincer, 2002). Σημαντική δουλειά έχει γίνει, τα τελευταία χρόνια στην τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά που αλλάζουν φάση αποθηκεύοντας ενέργεια κυρίως με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας (Kenisarin and Mahkamov, 2007; Sharma et al., 2004 and 2008), όπως είναι διάφορα ένυδρα άλατα, παραφίνες, ευτηκτικά μείγματα κ.α. Η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο να μελετηθεί η αποθήκευση ηλιακής ενέργειας με αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα και να αξιολογηθούν δύο υλικά αποθήκευσης, ο ασβεστόλιθος και μια συνθετική παραφίνη.

2. Υλικά και μέθοδοι

Για τις ανάγκες της μελέτης αυτής κατασκευάστηκε μια πειραματική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει ηλιακή καμινάδα διπλής παροχής επιφάνειας 2.0 m², έναν ηλιακό συλλέκτη αέρα επιφάνειας 1.6 m², ένα τούνελ συμπληρωματικής θέρμανσης του αέρα με ρυθμιζόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις για προσομοίωση του ηλιακού συλλέκτη, έναν βοηθητικό στροβιλοκινητήρα ρυθμιζόμενης ταχύτητας, μια μονωμένη μεταλλική αποθήκη στερεών υλικών (π.χ. λίθων) αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα, μια πανομοιότυπη αποθήκη υλικών αποθήκευσης με αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα (PCM) και τέλος έναν θερμαινόμενο εργαστηριακό χώρο 63.5 m². Σ' όλα τα σημεία εισόδου και εξόδου των αναφερθέντων υποσυστημάτων καθώς και στο γεωμετρικό κέντρο των υλικών αποθήκευσης, τοποθετήθηκαν αισθητήρια μέτρησης για συνεχή καταγραφή της θερμοκρασίας, ενώ στη είσοδο και στην έξοδο του αέρα στο χώρο θέρμανσης/ ανακύκλωσης γίνεται μέτρηση, και καταγραφή της παροχής του αέρα, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας.

Τα υλικά αποθήκευσης θερμικής ενέργειας τοποθετούνται σε δύο πανομοιότυπες μεταλλικές δεξαμενές διαστάσεων μήκους 60cm, πλάτους 50cm και ύψους 100cm. Η συνολική χωρητικότητα της κάθε δεξαμενής είναι $0.3m^3$. Κάθε δεξαμενή έχει μία κυκλική είσοδο διαμέτρου 200mm στο κέντρο της οροφής και μια ίδιας μορφής έξοδο στο κατώτερο σημείο μιας κατακόρυφης πλευράς. Οι δύο δεξαμενές είναι συνδεδεμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να τις παρακάμπτουμε χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σωληνώσεις και κλαπέτα. Οι δύο δεξαμενές καθώς και όλες οι σωληνώσεις έχουν μονωθεί με πετροβάμβακα πάχους 5cm επενδεδυμένο με φιλμ αλουμινίου. Για τη συμπληρωματική θέρμανση ή τη προσομοίωση των ηλιακών υποσυστημάτων χρησιμοποιούνται αερόθερμα ηλεκτρικών αντιστάσεων μεταβλητής ηλεκτρικής ισχύος και μέγιστης συνολικής ισχύος $W_{el} = 4000W$.

Ως υλικό αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα χρησιμοποιήθηκε μια μάζα 360 kg ασβεστολιθικής κροκάλας με φαινόμενη πυκνότητα σώρευσης 1560 kg/m³ και πορώδες περίπου 0.45. Το υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το RT20 wax paraffin PCM της γερμανικής εταιρείας RUBITHERM με σημείο τήξης 22°C, λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης 130 kJ.kg και μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή 10%. Μάζα 55 kg της συνθετικής αυτής παραφίνης συσκευάστηκε σε 186 πλαστικές φιάλες όγκου

0,5 l, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε διάταξη τέτοια μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης ώστε η φαινόμενη πυκνότητα να είναι ίση με 325 kg/m³ και το πορώδες περίπου ίσο με 0.48. Το συνολικό (μικτό) βάρος των συσκευασμένων πλαστικών φιαλών με το RT20 ήταν 58.170 kg.

Χρησιμοποιήθηκαν 7 φορητά HOBO Data logger καθένα από τα οποία μετρούσαν και κατέγραφαν αφ' ενός μεν τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (ακρίβειες αντίστοιχα ±0.5°C και ±3%) της τοποθεσίας τους, αφ' ετέρου δε δύο ακόμη θερμοκρασίες από απόσταση με αισθητήρες. Ένα πυρανόμετρο μετρούσε και κατέγραφε την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη. Για την μέτρηση της ταχύτητας του αέρα χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο Testo 440 με ακρίβεια ±0.1m/s. Η εκτίμηση της παροχής μάζας του αέρα που κυκλοφορεί στην πειραματική εγκατάσταση έγινε από μετρήσεις της μέσης ταχύτητας του αέρα στην κατακόρυφη έξοδο του αεραγωγού στο χώρο θέρμανσης, μετά από τροποποίηση του άκρου του ώστε να επιτευχθεί εξομάλυνση του πεδίου ταχυτήτων.

Για τις τέσσερις ταχύτητες περιστροφής του ανεμιστήρα και για κάθε μορφή αποθήκευσης αντιστοιχούν παροχές μάζας του κυκλοφορούντα αέρα που κυμαίνονται μεταξύ 0.026 kg/s και 0.035 kg/s, ενώ η παροχή ανακυκλοφορίας και αποφόρτισης της αποθήκης για την νυχτερινή θέρμανση είναι η μικρότερη δυνατή της τάξεως των 0.023 kg/s.

3. Αποτελέσματα και σχόλια

Με βάση τα αποτελέσματα θερμικών απωλειών του χώρου θέρμανσης, που είναι σημαντικές διότι διαθέτει πολλές μεταλλικές και υάλινες επιφάνειες (μέσος συντελεστής ολικής θερμοπερατότητας $\overline{U} = 4.3 \text{ W/m}^2 \text{°C}$), μπορεί αυτός να προσομοιαστεί περισσότερο με θερμοκήπιο. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων θεωρήσαμε μια καλλιέργεια όπως είναι το τριαντάφυλλο, το οποίο απαιτεί μια ελάγιστη θερμοκρασία χειμώνα περίπου 16°C. Η συμπεριφορά των ηλιακών υποσυστημάτων μια χειμερινή ημέρα με χαμηλή ηλιοφάνεια (μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία 300 W/m²) και μια με σχετικά υψηλή ηλιοφάνεια (μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία 420 W/m²) παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του αέρα σε μια ημέρα με χαμηλή ηλιοφάνεια ανέρχεται στους 50-55°C ενώ με υψηλή ηλιοφάνεια υπερβαίνει τους 70°C. Με βάση τις μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα που επιτεύχθηκαν η απόδοση της συστοιχίας "καμινάδασυλλέκτης" μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Για κάθε είδος αποθήκευσης (ασβεστόλιθοι, παραφίνη ή μικτά) χρησιμοποιήθηκαν δύο ισχείς θέρμανσης. Στην πρώτη οι ηλεκτρικές αντιστάσεις λειτούργησαν στα 2000W ώστε να θερμαίνουν τον αέρα κοντά στους 55°C και να προσομοιώνουν μια ψυχρή νεφελώδη ημέρα. Στη δεύτερη η θέρμανση έγινε με ηλεκτρική ισχύ 3000W θερμαίνοντας τον αέρα κοντά στους 70°C και προσομοιώνοντας μία ημέρα με καλή ηλιοφάνεια. Όπως προαναφέραμε χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικές τάσεις ρεύματος και αντίστοιχα παροχές μάζας αέρα στα 50V, στα 60V, στα 80V και στα 110V κατά την φάση φόρτισης της θερμικής αποθήκης, ενώ κατά την αποφόρτιση και θέρμανση του χώρου ρυθμίζαμε την τάση στα 50V, με παράλληλο στραγγαλισμό της αναρρόφησης του αέρα στο χώρο θέρμανσης ώστε η παροχή μάζας να κατέλθει στα 0.025 kg/s. Έχοντας θεωρήσει ως ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία χώρου τους





Σχήμα 1. Θερμοκρασιακή μεταβολή του αέρα στην ηλιακή καμινάδα και τον συλλέκτη σε μία κρύα ημέρα με μικρή ηλιοφάνεια (άνω) και σε μια θερμή με μεγαλύτερη ηλιοφάνεια (κάτω).

16°C σε αυτό το θερμοκρασιακό σημείο σταματάει και ο χρόνος αποφόρτισης της θερμικής αποθήκης. Για τον υπολογισμό των ποσών θερμότητας κατά την λειτουργία των θερμικών αποθηκών χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχέσεις:

$$Q = \mathbf{m}\mathbf{c}_{p}\Delta T$$

$$Q = \int_{T_{i}}^{T_{m}} mC_{p} \, \mathrm{d}T + ma_{m}\Delta h_{m} + \int_{T_{m}}^{T_{f}} mC_{p} \, \mathrm{d}T$$

$$Q = m[C_{\mathrm{sp}}(T_{m} - T_{i}) + a_{m}\Delta h_{m} + C_{\mathrm{lp}}(T_{\mathrm{f}} - T_{m})]$$

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι θερμοκρασιακές μεταβολές του αέρα και του υλικού αποθήκευσης με αλλαγή φάσης (PCM) κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση της θερμικής αποθήκης. Υπολογίζοντας τα ποσά θερμότητας που μεταφέρει ο αέρας σε κάθε φάση (φόρτιση- αποφόρτιση) και αυτά που αποθηκεύει ή αποδίδει το υλικό, καταρτίστηκαν τα διαγράμματα του σχήματος 3, ένα για κάθε παροχή φόρτισης.





Σχήμα 2. Θερμοκρασιακές μεταβολές αέρα και PCM κατά τη φόρτιση (άνω) και αποφόρτιση (κάτω) της θερμικής αποθήκης.(Ισχύς θέρμανσης 2000W, παροχή αέρα φόρτισης 0.030 kg/s και αποφόρτισης 0.025 kg/s).



Σχήμα 3. Ποσά θερμότητας αέρα και PCM κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση για τις τέσσερις διαφορετικές παροχές αέρα με ισχύ θέρμανσης 2000W.

Παρατηρείται ότι με τη αύξηση της παροχής του αέρα η αποθηκευόμενη θερμότητα δεν αυξάνει σημαντικά, ενώ από πλευράς τελικής θερμότητας που μεταφέρει ο αέρας για θέρμανση, το αποτέλεσμα είναι δυσμενέστερο. Παράλληλα παρατηρείται μείωση του χρόνου φόρτισης, που είναι αναμενόμενο, αλλά και αποφόρτισης που καθιστά την αύξηση της παροχής αναποτελεσματική. Με τη μικρότερη παροχή αέρα (0.030 kg/s) απαιτούνται 5 ώρες φόρτισης ενώ η αποφόρτιση διαρκεί 5 ώρες.

Κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση της αποθήκης με ισχύ θέρμανσης του αέρα 3000W, τα ποσά θερμότητας που μεταφέρει ο αέρας κατά τη φόρτιση ή εκφόρτιση ή που αποθηκεύει ή αποδίδει το υλικό στις διάφορες παροχές του αέρα μεταβάλλονται όπως δείχνει το σχήμα 4. Η καλύτερη περίπτωση εδώ είναι η μέγιστη παροχή (0.035 kg/s) με χρόνο φόρτισης της αποθήκης τις 4 περίπου ώρες και χρόνο αποφόρτισης 6.5 ώρες.



Σχήμα 4. Ποσά θερμότητας αέρα και PCM κατά τη φόρτιση με τις τέσσερις διαφορετικές παροχές αέρα και ισχύ θέρμανσης 3000W, αποφόρτιση δε με παροχή 0.023 kg/s.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται ενδεικτικά και για τη μικρότερη παροχή αέρα, οι θερμοκρασιακές μεταβολές του αέρα και του υλικού αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα (ασβεστόλιθος) κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση με ισχύ θέρμανσης 2000W. Οι παροχές αέρα που δοκιμάστηκαν ήταν 0.033kg/s (50V), 0,037 kg/s (60V), 0.040 kg/s (80V), 0.044 kg/s (110V), ενώ η παροχή κατά την αποφόρτιση και θέρμανση του χώρου ήταν 0.028 kg/s. Τα ποσά θερμότητας που μεταφέρονται από τον αέρα, αποθηκεύονται ή αποδίδονται από τους λίθους μεταβάλλονται ανάλογα με την παροχή του αέρα κατά την θέρμανση όπως δείχνει το σχήμα 6. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της παροχής του αέρα η αποδιδόμενη σ' αυτόν θερμότητα για τη θέρμανση του χώρου παρουσιάζει ένα μέγιστο (11,500 kJ) με παροχή αέρα 0.040 kg/s. Ο χρόνος φόρτισης ήταν 4 ώρες και αποφόρτισης 4.5 ώρες.



Σχήμα 5. Θερμοκρασιακές μεταβολές αέρα και ασβεστόλιθου κατά τη φόρτιση (άνω) και αποφόρτιση (κάτω) της θερμικής αποθήκης. Ισχύς θέρμανσης 2000W, παροχή αέρα φόρτισης 0.040 kg/s και αποφόρτισης 0.028 kg/s.



Σχήμα 6. Ποσά θερμότητας αέρα και ασβεστολιθικής κροκάλας κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση για τις τέσσερις διαφορετικές παροχές αέρα με ισχύ θέρμανσης 2000W.

Κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση στα πειράματα θέρμανσης με ισχύ 3000W τα ποσά που η αποθήκη του ασβεστόλιθου απέδωσε στον αέρα θέρμανσης του χώρου αυξάνονται με την παροχή του αέρα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (σχήμα 7), με μέγιστη τελική τιμή 13,500 kJ περίπου, χρόνο φόρτισης 3.5 ώρες και χρόνο αποφόρτισης 4.5 ώρες.



Σχήμα 7. Ποσά θερμότητας αέρα και ασβεστολιθικής κροκάλας κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση για τις τέσσερις διαφορετικές παροχές αέρα και ισχύ θέρμανσης 3000W και αποφόρτιση με παροχή 0.023 kg/s.

Στα πειράματα με τις δύο θερμικές αποθήκες χρησιμοποιήθηκαν παροχές αέρα 0.026, 0.029, 0.030 και 0.031 kg/s, ενώ η παροχή αποφόρτισης/ θέρμανσης τη νύχτα ήταν 0.023 kg/s. Στο ενδεικτικό σχήμα 8 εμφανίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα και των δύο αποθηκών κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση καθώς και ο χρόνος φόρτισης και αποφόρτισης.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμικής ενέργειας που μεταφέρει ο αέρας που αποθηκεύουν ή επαναποδίδουν οι δύο αποθήκες συναρτήσει των διαφόρων παροχών αέρα θέρμανσης. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της παροχής του αέρα αυξάνεται η ενέργεια που μεταφέρει αυτός προς τις αποθήκες οι οποίες όμως αποθηκεύουν και επαναποδίδουν σταθερή πρακτικά ενέργεια. Η ενέργεια δε που τελικά εποναναποδίδεται στον αέρα τη νύχτα για θέρμανση δεν ξεπερνά τα 9,500 kJ, ενώ στην αποθήκη με PCM επαναποδίδονται 11,000 – 13,000 kJ και στην αποθήκη με ασβεστόλιθους περί 11,500- 13,500 kJ. Επομένως δε συνίσταται η χρήση διπλού τύπου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.





Σχήμα 8. Μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα, ασβεστολιθικής κροκάλας και PCM κατά τη φόρτιση (άνω) και αποφόρτιση (κάτω) της θερμικής αποθήκης. Ισχύς θέρμανσης 3000W, παροχή αέρα φόρτισης 0.029 kg/s.



Σχήμα 9. Ποσά θερμότητας αέρα, ασβεστολιθικής κροκάλας και PCM κατά τη φόρτιση με τις τέσσερις διαφορετικές παροχές αέρα και ισχύ θέρμανσης 3000W και αποφόρτιση με παροχή 0.023kg/s

4. Συμπεράσματα

- Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με αισθητή θερμότητα χρησιμοποιώντας 360 kg ασβεστόλιθων μπορεί να επαναποδώσει, στον αέρα θέρμανσης 11,500 έως 13,500 kJ ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία έχει ανέλθει το υλικό (54°C και 68°C αντίστοιχα).
- Η αποθήκευση με αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα και υλικό αποθήκευσης συνθετική παραφίνη RT20 (55 kg) μπορεί να επαναποδώσει 11,000 έως 13,000 kJ ανάλογα με την τελική θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης (47°C και 66°C αντίστοιχα).
- Η μικτή αποθήκευση με τα δύο υλικά δεν αποδεικνύεται το ίδιο αποτελεσματική αφού δεν μπορεί να επαναποδώσει θερμότητα μεγαλύτερη από 9,500 kJ.
- Για την πλήρη κάλυψη των αναγκών θέρμανσης του επιλεγμένου χώρου, ο οποίος με μέσο συντελεστή ολικής θερμοπερατότητας Ū= 4.3 W/m²°C παρουσιάζει μέση ισχύ απωλειών 4,400W καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας, απαιτείται τριπλασιασμός της αποθήκης του RT20 ή τετραπλασιασμός της αποθήκης με ασβεστόλιθο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Argiriou A., (1997). CSHPSS Systems in Greece: Test of simulation software and analysis of typical systems. Solar Energy Vol.60 pp. 159-170.
- Dincer I., (2002). Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. Energy Res., Vol. 26, pp. 567-588.
- Kenisarin Murat, Mahkamov Khamid, (2007). Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, pp. 1913–1965.
- Sharma Dutt, Kitano Hiroaki, Sagara Kazunobu, (2004). Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications. Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ., Vol. 29, pp. 31-64.
- Sharma Atul, Tyagi V.V, Chen C.R., Buddhi D., (2008), Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 47, pp. 1-28
- Ucar A., Inalli M., (2005). Thermal and economical analysis of a central solar heating system with underground seasonal storage in Turkey. Renewable Energy, Vol. 30, pp. 1005-1019.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ (EMAP) ΓΙΑ ΤΟΜΑΤΙΝΙΑ

Α. Μυστριώτης¹, Α. Γιαννούλης¹, Δ. Μπριασούλης¹ ¹Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855 <u>briassou@aua.gr, amistr@aua.gr, sosat1012@yahoo.com</u>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια τρισδιαστατη αριθμητική προσομοίωση αναπτύχθηκε με στοχο το σχεδιασμό συσκευασίας σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα ισορροπίας (equilibrium modified atmosphere packaging - EMAP) για τοματίνια. Ως υλικό κάλυψης της συσκευασίας επιλέχθηκε μεμβράνη από βιοδιασπώμενο, φυτικής προέλευσης πλαστικό PLA έπειτα από εργαστηριακά πειράματα σχετικά με την περατότητά της στο CO₂, O₂ και τους υδρατμούς. Οι επιδιωκόμενες τιμές συγκεντρώσεων των αερίων του μίγματος στη συσκευασία προσδιορίσθηκαν μέσω εργαστηριακών πειραμάτων. Το εμβαδό του περατού σε υδρατμούς υλικού συσκευασίας καθώς και ο αριθμός των οπών προσδιορίσθηκε μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων. Οι παράμετροι αυτές είναι ικανές για την επίτευξη των επιδιωκόμενων τιμών συγκεντρώσεων των αερίων της τροποποιημένης ατμόσφαιρας εντός της συσκευασίας. Η αριθμητική προσομοίωση αποδείχθηκε ένα χρήσιμο εργαλείο για τη επίλυση αντίστοιχων προβλημάτων και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό συσκευασιών σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα και άλλων ευαίσθητων φρούτων και λαχανικών.

Λέξεις Κλειδιά: αριθμητική προσομοίωση, συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας, ΕΜΑΡ, τοματίνια

3D NUMERICAL SIMULATION FOR THE DESIGN OF A MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGE (MAP) FOR CHERRY TOMATOES

A. Mistriotis¹, A. Giannoulis¹, D. Briassoulis¹

¹Laboratory of Agricultural Structures, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 briassou@aua.gr, amistr@aua.gr, sosat1012@yahoo.com

ABSTRACT

A 3D numerical simulation was employed in order to design an equilibrium modified atmosphere (EMA) package for cherry tomatoes. The packaging material was selected to be PLA, a compostable biobased plastic, after laboratory experiments regarding its barrier properties. The in-package gas concentration targeted values of the EMA surrounding the commodity were also specified through laboratory experiments. A number of numerical simulations were carried out in order to choose the envelope area and the number and geometrical characteristics of microperforations needed for the targeted gas mixture values to be achieved. The numerical simulation was proven to be an efficient tool for the solution of such problems and could be used for the design of modified atmosphere packages of other sensitive fruits and vegetables.

Keywords: numerical simulation, EMAP, cherry tomatoes

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δημιουργία συσκευασίας με τροποποιημένη ατμόσφαιρα ισορροπίας (EMAP) είναι μια διαδικασία η οποία αποσκοπεί στη βέλτιστη διατήρηση ευαίσθητων αγαθών. Κυρίως λόγοι υγείας αλλά και οικονομικοί λόγοι κάνουν σημαντική τη βελτίωση των συνθηκών αποθήκευσης και επομένως της ασφάλειας και ποιότητας των προϊόντων αλλά και την επιμήκυνση του χρόνου ζωής των προς κατανάλωση φρούτων και λαχανικών. Η κύρια ιδέα στην οποία βασίζεται η διαδικασία αυτή είναι η δημιουργία εντός της συσκευασίας μιας τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας που περιβάλλει το αγαθό ώστε να είναι εφικτή η αύξηση του χρόνου ζωής του αλλά και η διατήρηση της ποιότητάς του σε υψηλά επίπεδα.

Τα σημαντικά αλλά και κυρίαρχα (για την διαδικασία EMAP) αέρια στο προαναφερθέν μίγμα είναι τα CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα), O₂ (οξυγόνο) και υδρατμοί (water vapor – WV). Οι βιολογικές διεργασίες που συντελούνται είναι η αναπνοή του νωπού προϊόντος (κατανάλωση O₂ και παραγωγή CO₂) και η διαπνοή (παραγωγή WV). Οι αλλαγές των συγκεντρώσεων οφείλονται ουσιαστικά στην αλληλεπίδραση του προϊόντος που αναπνέει και διαπνέει και του περιβάλλοντος και η μεταφορά και ανταλλαγή των αερίων γίνεται με τη βοήθεια της διεργασίας της διάχυσης. Είναι προφανές πως οι συνθήκες συσκευασίας κάθε νωπού προϊόντος δεν μπορεί να είναι οι ίδιες. Η κατανάλωση O₂ καθώς και η παραγωγή CO₂ και WV μπορεί να διαφέρει πολύ για διαφορετικά προϊόντα και συνθήκες αποθήκευσης οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας συσκευασία πρέπει να είναι κάθε φορά προσαρμοσμένη στις ανάγκες του συγκεκριμένου φρούτου ή λαχανικού που μελετάται.

Ερευνητικές μελέτες σχετικά με τις συσκευασίες τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας παρουσιάζουν μαθηματικά μοντέλα τα οποία είναι ικανά να περιγράψουν τη μεταφορά αερίων μέσω μικρο-οπών (Melkikh and Seleznev, 1994; Fishman et al, 1995; Fishman et al, 1996; Fonseca et al, 2000; Paul and Clarke, 2002). Στο μεγαλύτερο ποσοστό τους χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση των μοντέλων που ανέπτυξαν. Αριθμητικές προσομοιώσεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση των συσκευασιών για τρόφιμα είναι αρκετά περιορισμένες στη διεθνή βιβλιογραφία (Rennie & Tavoularis, 2009). Πρόσφατα, πλαστικά φύλλα με μικρο-οπές από βιοδιασπώμενα υλικά π.χ. πολυλακτικό οξύ - PLA) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συσκευασίες τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας μελετήθηκαν ως προς τη περατότητα σε αέρια (Hortibiopack, 2011; Mistriotis et al, 2011). Φαινόμενα μεταφοράς όπως η διάχυση μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια μέσω υπολογιστικών μεθόδων εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα που απαιτούνται από ένα εργαστηριακό πείραμα.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση με στόχο την δημιουργία βέλτιστης συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας για τοματίνια. Οι επιδιωκόμενες τιμές συγκεντρώσεων των αερίων στη τροποποιημένη ατμόσφαιρα που περιβάλλει τα τοματίνια έχει υπολογισθεί από εργαστηριακά πειράματα. Όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν μη χρονικά μεταβαλλόμενες (steady-state). Η επιλογή αυτή έγινε μετά από εργαστηριακά πειράματα που έδειξαν πως το χρονικό διάστημα πριν το μίγμα αερίων έλθει σε ισορροπία είναι μικρό και δεν επηρεάζει τις τελικές συγκεντρώσεις των αερίων του μίγματος στο εσωτερικό της συσκευασίας. Για τα τοματίνια έγινε η υπόθεση πως ο ρυθμός αναπνοής και διαπνοής είναι σταθερός, όπως σταθερή θεωρήθηκε και η θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου. Το πρόβλημα επιλύθηκε ως πρόβλημα διάχυσης, ενώ δεν συνυπολογίστηκε η επίδραση της συναγωγής (που βρέθηκε αμελητέα) λόγω των οπών στο υλικό κάλυψης της

συσκευασίας, καθώς οι οπές συμπεριλαμβάνονται στο σχεδιασμό της συγκεκριμένης συσκευασίας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ (ΜΑΡ)

Η διαδικασία δημιουργίας συσκευασίας με τροποποιημένη ατμόσφαιρα βασίζεται στην ιδέα της επιβράδυνσης του ρυθμού των φυσιολογικών διεργασιών, όπως η διαδικασία ωρίμανσης του νωπού προϊόντος ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση της συγκέντρωσης του O₂ και την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ αλλά μέσα σε συγκεκριμένα όρια για κάθε προϊόν για να αποφευχθούν αρνητικές παρενέργειες. Η συγκέντρωση των υδρατμών είναι εξίσου σημαντική για τη δημιουργία της βέλτιστης συσκευασίας. Η αυξημένη συγκέντρωση υδρατμών (το οποίο σημαίνει αυξημένη σχετική υγρασία – relative humidity (RH)) αποτρέπει τη αφυδάτωση του νωπού προϊόντος διατηρώντας το συνάμα φρέσκο. Αντίθετα, υψηλή σχετική υγρασία αυξάνει τη πιθανότητα προσβολών από μύκητες.

Η μεταβολή των συγκεντρώσεων προκύπτει από την διάχυση των αερίων στο μίγμα εντός της συσκευασίας. Το εσωτερικό της συσκευασίας αλληλεπιδρά με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω του υλικού κάλυψης και των οπών σε αυτό. Ανάλογα με την περατότητα του υλικού κάλυψης σε κάθε αέριο, τα αέρια εκρέουν στο περιβάλλον εξωτερικά της συσκευασίας είτε εισέρχονται σε αυτό. Το ίδιο συμβαίνει και μέσω των οπών. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα το μίγμα έρχεται σε ισορροπία και οι συγκεντρώσεις των επιμέρους αερίων παραμένουν σταθερές. Από εργαστηριακά πειράματα (D' Aquino, 2011) μετρήθηκαν για τοματίνια ποικιλίας Dorothea οι βέλτιστες συγκεντρώσεις στο εσωτερικό της συσκευασίας στην κατάσταση ισορροπίας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Επιδιωκόμενες τιμές του μίγματος αερίων για την συσκευασία σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα ισορροπίας για *1kg* τοματίνια (D' Aquino, 2011).

Συνθήκες Αποθήκευσης	Ρυθμός Αναπνοής mL(CO ₂)h ⁻¹	Ρυθμός Διαπνοής g(H ₂ O) d ⁻¹	EMAP <i>kPa CO</i> ₂	EMAP <i>kPa O</i> ₂	ΕΜΑΡ Συνθήκες
18-20°C 60-65% RH	12-15	4-6	2-6	15-20	18-20°C 80-90% RH

Οι επιδιωκόμενες τιμές του O_2 και CO_2 στον Πίνακα 1 δίνονται σε μερικές πιέσεις, αλλά μπορούν πολύ απλά να μετατραπούν σε συγκεντρώσεις με τη βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης των αερίων. Επίσης, οι τιμές των ρυθμών αναπνοής αντιστοιχούν σε *1kg* τοματίνια.

2.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΕΣΩ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Η μεταφορά ενός αερίου μέσω διάχυσης (π.χ. η διάχυση ενός αερίου σε άλλο αέριο) μπορεί να περιγραφεί πλήρως από το νόμο του Fick (η εξίσωση 1 είναι η μονοδιάστατη περίπτωση του νόμου):

$$J = -D\frac{\partial\varphi}{\partial x} \tag{1}$$

Όπου: *J*: η ροή λόγω διάχυσης (mol m⁻² s⁻¹) *D*: ο συντελεστής διάχυσης του αερίου στο μέσο (m² s⁻¹) φ :η μοριακή συγκέντρωση του αερίου (mol m⁻³)

Παρά το γεγονός πως ο νόμος του Fick θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στην περίπτωση μίγματος αερίων (και όχι δυο μόνο αερίων όπως αρχικά ορίζεται), ένας πιο σύνθετος νόμος, ο νόμος των Stephan – Maxwell, είναι αυτός που περιγράφει ολοκληρωτικά το φαινόμενο της διάχυσης σε ένα μιγμα αερίων.

$$-\frac{PR}{T}\frac{\partial Y_i}{\partial x} = \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^n \frac{\Phi_{pi}Y_j - \Phi_{pj}Y_i}{D_{ij}}$$
(2)

Όπου:

- *P*: η ατμοσφαιρική πίεση (Pa)
- *R*: η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,31 m³ Pa mol⁻¹ K⁻¹)
- Τ: η θερμοκρασία (Κ)
- Y_i : το μοριακό κλάσμα του αερίου i (αντίστοιχα για το αέριο j)
- Φ_{pi} :
ο ρυθμός μεταφοράς του αερίου i δια μέσω των οπών (αντίστοιχα για το
αέριο j)
- D_{ij} : ο συντελεστής διάχυσης του αερίου i στο αέριο j
- n: ο αριθμός των αερίων που αποτελούν το μίγμα

Παρά την ύπαρξη μίγματος αερίων στην παρούσα αριθμητική προσομοίωση της συσκευασίας, η διάχυση των αερίων απεικονίζεται στο υπολογιστικό πακέτο με τη βοήθεια του νόμου του Fick και όχι του νόμου των Stephan-Maxwell ο οποίος θα ήταν πιο κατάλληλος. Το λογισμικό υποθέτει απλά πως κάθε αέριο του μίγματος διαχέεται μόνο μέσα στο N₂. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη παραδοχή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματά. Οι συγκεντρώσεις των CO₂ και WV στο μίγματος σε αυτά να είναι ασήμαντη. Αυτό σημαίνει ότι η διάχυση πραγματοποιείται ουσιαστικά μέσω των αερίων N₂ και O₂. Οι συντελεστές διάχυσης όμως των CO₂ και WV στα αέρια N₂ και O₂ είναι ίσοι με αποτέλεσμα η συνολική διεργασία της διάχυσης να οδηγεί στο ίδιο τελικό μίγμα ισορροπίας στη συσκευασία.

2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου ANSYS CFX. Το συγκεκριμένο υπολογιστικό πακέτο επιλύει ρευστοδυναμικά προβλήματα με τη βοήθεια της θεωρίας των πεπερασμένων όγκων. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση ήταν να επιλύσει το υπολογιστικό πρόγραμμα τις εξισώσεις *Navier – Stokes* (εξισώσεις που διέπουν τα προβλήματα ρευστοδυναμικής φύσεως) διατηρώντας μόνο τους όρους διάχυσης.



Εικόνα 1. Η γεωμετρία της συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας για τοματίνια

Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο παραλληλεπίπεδης συσκευασίας (σχήμα κουτιού) (Σχήμα 1). Οι διαστάσεις της συσκευασίας ήταν 10cm x 10cm x 8.5cm. Το εμβαδό της εξωτερικής κάλυψης της συσκευασίας από μεμβράνη PLA ήταν 572 cm². Στην εξωτερική επιφάνεια της συσκευασίας (Εικόνα 1) υπάργουν επίσης 4 οπές με 600μ διάμετρο η κάθε μια. Οι οπές τοποθετήθηκαν αρκετά μακριά η μία από την άλλη ώστε η επίδραση της κάθε οπής στην αλληλεπίδραση της συσκευασίας με το περιβάλλον να μην επηρεάζεται από την αντίστοιχη λειτουργία των άλλων οπών. Το εσωτερικό της συσκευασίας αποτελείτο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, από ένα όγκο ο οποίος αντιστοιχεί στα τοματίνια. Το μέγεθος του όγκου αυτού αντιστοιχεί στον πραγματικό όγκο του νωπού προϊόντος. Το μέγεθος και το σχήμα του όγκου δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης από τη στιγμή που η παραγωγή και η λήψη των αερίων του μίγματος εισάγονται στο υπολογιστικό πακέτο με τη μορφή πηγής ή απορρόφησης ανά μονάδα επιφάνειας. Η απεικόνιση της ακριβούς γεωμετρίας που έχουν τα τοματίνια δεν κρίθηκε αναγκαία διότι μια τέτοια ιδιαίτερη γεωμετρία θα αύξανε σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο με ουσιαστικά αμελητέα επίπτωση στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στον όγκο της τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας της συσκευασίας ανάμεσα στα τοματίνια και την μεμβράνη έπρεπε να επιτευχθούν οι επιδιωκόμενες τιμές των συγκεντρώσεων των αερίων του μίγματος όπως αναγράφονται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 2. Το πλέγμα του αριθμητικού μοντέλου με τετραεδρικά στοιχεία (παρουσιάζεται η άνω επιφάνεια της μεμβράνης κοντά σε μια από τις οπές)

Το μοντέλο διακριτοποιήθηκε συνολικά με τετραεδρικά στοιχεία όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Στην Εικόνα 2 παρατηρούμε ότι έχει χρησιμοποιηθεί ομοιόμορφο πλέγμα με πύκνωση κοντά στις οπές. Η πύκνωση αυτή έχει γίνει λόγω γεωμετρίας (οι οπές είναι μικρές και συνεπώς μικρότερου μεγέθους είναι και τα στοιχεία στις θέσεις αυτές). Η αριθμητική επίλυση της τρισδιάστατης εξίσωσης διάχυσης γίνεται γρήγορα και εύκολα και δεν απαιτείται ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα για την απεικόνιση του φαινομένου. Παρόλα αυτά γίνανε δοκιμές με πυκνότερα πλέγματα ώστε να ελεγχθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων. Δεν παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα για πλέγματα πυκνότερα αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Ο αριθμός των τετραεδρικών στοιχείων του συγκεκριμένου πλέγματος που τελικά χρησιμοποιήθηκε ήταν 273130 και ο αριθμός των δημιουργούμενων κόμβων 58154.

Πίνακας 2. Δεδομένα και οριακές συνθήκες για την αριθμητική προσομοίωση
συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας για τοματίνια μάζας 250gr σε
$θ$ ερμοκρασία $20^{o}C$.

Οριακές Συνθήκες στην εξωτερική επιφάνεια της μεμβρανης PLA και στις οπές									
Κλάσμα Μάζας O_2 (%)	Κλάσμα Μάζας CO ₂ (%)	Κλάσμα Μάζας υδρατμών (%)							
21	0	0.009 (65% RH)							
Πηγές CO2 και υδρατμών – Απορρόφηση Ο2									
Πηγή CO ₂ (ml/h)	Πηγή υδρατμών (g/d)	$Λ$ ήψη O_2 (ml/h)							
3	1.25	3							
Συντελεστ	ές Διάχυσης Αερίων του Μί	γματος στον Αέρα							
$D_{CO_2-N_2} (m^2 s^{-1})$	$D_{O2-N2} (m^2 s^{-1})$	$D_{H2O-N2} (m^2 s^{-1})$							
1.60E-05	2.00E-05	2.40E-05							
Συντελεστές	Διάχυσης Αερίων του Μίγμ	ατος στην Μεμβράνη							
$D_{CO_2-PLA} (m^2 s^{-1})$	$D_{O2-PLA} (m^2 s^{-1})$	$D_{H2O-PLA} (m^2 s^{-1})$							
7.00E-11	7.00E-11	8.16E-08							

Το μίγμα αερίων στη συσκευασία αποτελείτο από O₂, CO₂, N₂ και WV. Θεωρήθηκε ποσότητα 250gr από τοματίνια και βάσει των τιμών για *1kg* τοματίνια ορίσθηκαν σαν σταθερές πηγές οι ρυθμοί παραγωγής του CO₂ και των υδρατμών, ενώ σαν σταθερή απορρόφηση ο ρυθμός κατανάλωσης O₂ από τα τοματίνια. Ορίσθηκαν επίσης οι τιμές του συντελεστή διάχυσης του κάθε αερίου στο άλλο όπως αυτές βρέθηκαν στην βιβλιογραφία (Massman, 1998). Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνθήκες περιβάλλοντος, όπως αυτές ορίζονται στον Πίνακα 1 και 2, για την εξωτερική επιφάνεια της μεμβράνης PLA και τις οπές. Όλες οι προαναφερθείσες τιμές αναγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Για το N₂ το κλάσμα μάζας προκύπτει αφαιρώντας το άθροισμα των κλασμάτων μάζας των λοιπών αερίων. Το περιβάλλον και η συσκευασία βρίσκονταν σε θερμοκρασία ίση με 20°C (επιλέχθηκε από την περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών του περιβάλλοντος της συσκευασίας που ορίσθηκαν ως επιδιωκόμενες) Η περιοχή όπου ορίσθηκε η μεμβράνη προσομοιώθηκε ως ένας χώρος όπου τα αέρια διαχέονται στο αέριο N_2 με αυξημένη δυσκολία. Για το λόγο αυτό ο συντελεστής διάχυσης των αερίων του μίγματος στην περιοχή της μεμβράνης είναι σημαντικά μικρότερος σχετικά με αυτόν της πραγματικής διάχυσής τους σε N_2 . Οι τιμές των συντελεστών διάχυσης των αερίων του μίγματος μέσω της μεμβράνης προσδιορίστηκαν μέσω εργαστηριακών πειραμάτων και παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 2.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός υπολογιστικών προσομοιώσεων πριν οριστικοποιηθεί το τελικό γεωμετρικό μοντέλο, όπως παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Η σκέψη με την οποία έγινε η σειρά των προσομοιώσεων αυτών είναι η εξής: Η μεμβράνη και οι οπές εξυπηρετούν δυο διαφορετικές λειτουργίες όπως έγινε αντιληπτό από τα αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων. Η μεμβράνη είναι αυτή που εξυπηρετεί τη μεταφορά των υδρατμών εντός και εκτός της συσκευασίας λόγω της σημαντικής περατότητάς της στους υδρατμούς. Ο συντελεστής διάχυσης της μεμβράνης για τα άλλα αέρια είναι εξαιρετικά μικρός και σχεδόν όλο το CO2 και O2 που συναλλάσει το περιβάλλον με τη συσκευασία γίνεται μέσω των οπών. Η διαδικασία σχεδιασμού συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας μπορεί να αναλυθεί σε δυο παράλληλους στόχους. Αρχικά, στην επίτευξη της επιδιωκόμενης συγκέντρωσης CO2 και O2 δημιουργώντας οπές κατάλληλης διαμέτρου. Παράλληλα, στην επίτευξη της επιδιωκόμενης συγκέντρωσης υδρατμών με τη χρήση της κατάλληλης περατής μεμβράνης αλλά και εμβαδού κάλυψης της συσκευασίας ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μεταφορά μάζας WV. Οι συγκεντρώσεις που προκύπτουν στο εσωτερικό της συσκευασίας είναι σχεδόν ομοιόμορφες όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα. Για μεμβράνη κάλυψης PLA εμβαδού 572cm² και για 4 οπές διαμέτρου 600μ στην κατάσταση ισορροπίας, στο εσωτερικό της συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

	EMAP	EMAP	ΕΜΑΡ Συνθήκες
	$kPa CO_2$	$kPa O_2$	
Ζητούμενα	2-6	15-20	20°C 80-90% RH
Αποτελέσματα	4.95±0.27	16.45±0.21	20°C 85 5%+1 5%

Πίνακας 3. Αποτελέσματα τελικής αριθμητικής προσομοίωσης

Είναι προφανές πως τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης επιτυγχάνουν τις επιδιωκόμενες τιμές όπως αυτές προσδιορίστηκαν από εργαστηριακά πειράματα. Από τις τιμές της σταθερής απόκλισης (standard deviation) φαίνεται πως γενικά οι συγκεντρώσεις των αερίων του μίγματος είναι ομοιόμορφες στο εσωτερικό της συσκευασίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός μιας συσκευασίας σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα ισορροπίας μπορεί να πραγματοποιηθεί προσδιορίζοντας τα εξής:

1) Υλικό-μεμβράνη κάλυψης της συσκευασίας

- Επιδιωκόμενες τιμές των συγκεντρώσεων των αερίων του μίγματος στη συσκευασία
- 3) Εμβαδό του υλικού κάλυψης
- 4) Αριθμός και μέγεθος οπών στο υλικό κάλυψης

Όλα τα παραπάνω βέβαια καθορίζονται κάθε φορά για το υπό εξέταση νωπό προϊόν. Στην παρούσα περίπτωση ήταν εφικτό μέσω της επιλεγείσας μεμβράνης PLA να ελεγχθεί η συγκέντρωση των υδρατμών, ενώ μέσω των οπών οι συγκεντρώσεις των CO₂ και O₂. Με τον κατάλληλο συνδυασμό μεμβράνης κάλυψης και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μεμβράνης και των οπών στη συσκευασία μπορεί να επιτευχθεί η ατμόσφαιρα που ευνοεί την επιμήκυνση της ζωής του συγκεκριμένου νωπού προϊόντος υπό δεδομένες συνθήκες αποθήκευσης.

Η δημιουργία συσκευασιών με τροποποιημένη ατμόσφαιρα ισορροπίας για ευαίσθητα φρούτα και λαχανικά αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία η οποία επιτρέπει τη συντήρησή τους και τη διατήρηση της ποιότητάς και ασφάλειάς τους σε υψηλά επίπεδα. Στην παρούσα εργασία έγινε εμφανές πως ο σχεδιασμός των συσκευασιών αυτών μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιώσεων. Απαιτούνται αρχικά εργαστηριακά πειράματα για τον προσδιορισμό των επιδιωκόμενων τιμών αλλά και των χαρακτηριστικών της μεμβράνης κάλυψης. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη των υπολογιστικών προσομοιώσεων μειώνει σημαντικά το χρόνο και το κόστος του τελικού σχεδιασμού. Κατά αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να σχεδιασθούν συσκευασίες τροποποιημένης ατμόσφαιρας ισορροπίας για κάθε ευαίσθητο νωπό προϊόν.

<u>Ευχαριστίες</u>: Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος HORTIBIOPACK το οποίο υποστηρίχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission – Seventh Framework Programme - FP7-SME-2008-1-232551).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- D' Aquino, S., 2011. Internal report of EU project HORTIBIOPACK, CNR-ISPA, Sassari, Italy.
- Fishman, S., Rodov, V., Peretz, J., Ben-Yehoshua, S., 1995. *Model gas exchange dynamics in modified-atmosphere packages of fruits and vegetables*. Journal of Food Science, 60: 1078-1083
- Fishman, S., Rodov, V., Ben-Yehoshua, S., 1996. *Mathematical model for perforation effect on oxygen and water vapor dynamics in modified-atmosphere packages.*mess Journal of Food Science, 61: 956-961
- Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R, Lino, I.B.M., Brecht, J.K., Chau, K.V., 2000. Modelling O₂ and CO₂ exchange for development of perforation-mediated modified atmosphere packaging. Journal of Food Science, 43: 9-15
- HortiBioPack, Development of innovative biodegradable packaging system to improve shelf life, quality and safety of high-value sensitive horticultural fresh produce, http://www.hortibiopack.aua.gr/
- Massman, W.J., 1998. A review of molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO and NO₂ in Air, O₂ and N₂ near STP. Atmospheric Environment, 32: 1111-1127.
- Melkikh, A.V, Seleznev, V.D., 1994. Model of gas diffusion through solid and porous membranes of finite thickness. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 66: 467-474
- Mistriotis, A., Giannoulis, A., Giannopoulos, D., Briassoulis, D., 2011. Analysis of the effect of perforation on the permeability of biodegradable non-barrier films,

Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food, ICEF11, "FOOD PROCESS ENGINEERING IN A CHANGING WORLD", May 22-26, 2011, Athens, Greece

- Paul, D.R., Clarke, R., 2002. Modeling of modified atmosphere packaging based on design with membrane and perforations. Journal of Membrane Science, 208: 269-283
- Rennie, T.J., Tavoularis, S., 2009. Perforation-mediated modified atmosphere packaging. Part II. Implementation and numerical solution of a mathematical model. Postharvest Biology and Technology, 51: 10-20.

ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ ΜΕ ΓΕΩΒΟΗΘΟΥΜΕΝΗ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ι.Φ. Παπαγεωργίου & Γ. Λαμπρινός

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Α.Φ.Π. & Γ.Μ., Ιερά Οδός 75, T.K. 11855, Αθήνα, Τηλ. 210 529 4029–4031, Fax. 210 529 4032, e-mail: ypvar@hotmail.com; refrigenergy@aua.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα χρήσης γεωβοηθούμενης αντλίας θερμότητας για τον κλιματισμό θαλάμων ανάπτυξης χοιριδίων, σε τρεις διαφορετικές Ελληνικές κλιματικές ζώνες (Φλώρινας, Χαλκίδας και Ιεράπετρας). Η διερεύνηση έγινε για τρία ψυκτικά ρευστά, το R134a το R22 και το R407A. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συντελεστές θερμικής συμπεριφοράς κυμαίνονται από 3.2 (Φλώρινα) έως 4.6 (Ιεράπετρα), ενώ αυτοί της ψυκτικής συμπεριφοράς από 5.0 (Ιεράπετρα) έως 7.8 (Φλώρινα). Μεταξύ των τριών ψυκτικών ρευστών, το R22 παρουσιάζει τις καλύτερες αποδόσεις. Από τα οικονομικά μεγέθη του χοιροστασίου της Χαλκίδας συμπεραίνεται ότι μόνο 15-20% του συνολικού κόστους της επένδυσης αντιστοιχεί στην αντλία θερμότητας εξαιρουμένου βέβαια του κόστους του γεωεναλλάκτη.

Λέζεις κλειδιά: Χοιροστάσιο, αντλία θερμότητας, γεωβοηθούμενη αντλία θερμότητας.

AIR-CONDITIONING OF PIGLETS BUILDING WITH GROUND COUPLED HEAT PUMP

Y.F. Papageorgiou & Gr. Lambrinos

Agricultural University of Athens, Dep. of N.R.M. & A.E., Lab. of Agricultural Engineering, 75 Iera Odos Str., Athens, Greece 11855, tel. +3 210 5294031, fax. +3 210 5294032, e-mail: ypvar@yahoo.gr; refrigenergy@aua.gr.

ABSTRACT

The use of a ground coupled heat pump for air conditioning of piglets growth chambers was studied. The research conducted for three different Greek climate zones namely Florina, Halkida and Ierapetra and for three refrigerants, R134a, R22 and R407A. From the conducted analysis was found that the coefficients of heating performance (COP_h) rank from 3.2 (Florina) up to 4.6 (Ierapetra) and the coefficients of cooling performance (COP_c) rank from 5.0 (Ierapetra) up to 7.8 (Florina). From the three tested refrigerants, R22 has the highest overall performance. As far as the economical figures of the investment concerns, only the 15-20% of the total investment accounts for the heat pump excluding the cost of the ground heat exchanger.

Key words: Swine farm, agricultural building, heat pump ground coupled heat pump

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του εδάφους ως πηγή θερμότητας πλεονεκτεί έναντι του ατμοσφαιρικού αέρα λόγω της θερμικής αδράνειας που παρουσιάζει μετά από ορισμένο βάθος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το γεγονός αυτό το καθιστά πρόσφορο σε εφαρμογές γεωβοηθούμενων αντλιών θερμότητας. Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν τις δυνατότητες χρήσεως του εδάφους σε ένα σύστημα κλιματισμού είναι η θερμοκρασία του, η σύσταση του και το υγρασιακό του περιεχόμενο. (Leong et al , 1998).

Η χρήση των γεωβοηθούμενων αντλιών θερμότητας σε αγροτικά κτίρια αποτελεί αντικείμενο το οποίο μέχρι τώρα για την Ελλάδα δεν έχει τύχει εκτενούς διερεύνησης. Σε διεθνές επίπεδο υπάρχουν σημαντικές έρευνες αναφορικά με τη χρήση του εδάφους ως πηγή θερμότητας και τις γεωβοηθούμενες αντλίες πλην όμως επικεντρώνονται κυρίως σε πειραματικές εφαρμογές του οικιστικού τομέα. Διακρίνουμε την εργασία των Healy και Ugursal (1997) που ασχολήθηκε με την πειραματική εφαρμογή μιας γεωβοηθούμενης αντλίας θερμότητας σε οικία και τις εργασίες των Diener και Deglin οι οποίες διερεύνησαν την χρήση υπόγειων σωληνώσεων αέρα σε κτίριο στέγασης κοτόπουλων και χοίρων αντίστοιχα (Diener et al 1986 ; Deglin et al, 1999). Ιδιαίτερα σημαντικές είναι και οι εργασίες των Ozgener και Hepbasli οι οποίοι μελέτησαν γεωβοηθούμενες αντλίες σε σύζευξη με ηλιακά συστήματα για κλιματισμό θερμοκηπίων (Ozgener & Hepbasli, 2005 ; Ozgener & Hepbasli, 2007).

Το βασικότερο κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας υπήρξε η έλλειψη μιας συστηματικής έρευνας σχετικά με τις δυνατότητες αξιοποίησης της γεωβοηθούμενης αντλίας θερμότητας σε κτίρια στέγασης ζώων και ειδικότερα σε κτίριο που στεγάζει χοιρίδια πρώτης ανάπτυξης. Το συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης απαιτεί ιδιάιτερη προσοχή σε θέματα ρύθμισης μικροπεριβάλλοντος ώστε να διασφαλίζεται η υγεία των χοιριδίων και η ομαλή ανάπτυξη τους, στοιχεία που με τη σειρά τους αυξάνουν την αποδοτικότητα της μονάδας εκτροφής (Παναγάκης, 2007).

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση των δυνατοτήτων χρήσης γεωβοηθούμενης αντλίας θερμότητας για κλιματισμό χοιροστασίου, ειδικότερα θαλάμων ανάπτυξης χοιριδίων σε τρεις διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ελλάδας (Φλώρινα, Χαλκίδα και Ιεράπετρα).

2. ΥΛΙΚΑ, ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Αρχικά εξετάσθηκαν τα κλιματικά δεδομένα των τριών περιοχών που έχουν επιλεγεί για την εγκατάσταση των χοιροστασίων. Με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα τριακονταετίας προσδιορίστηκαν οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες χειμώνα και οι μέσες μέγιστες θέρους καθώς και οι αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας για κάθε περιοχή. Παράλληλα υπολογίσθηκαν τα ψυχρομετρικά δεδομένα των δυσμενέστερων κλιματολογικά ημερών του έτους, για κάθε περιοχή.

Υπολογίσθηκε η θερμοκρασία του εδάφους σε συνδυασμό με το βάθος για κάθε περιοχή. Ο υπολογισμός έγινε με τη σχέση του Kasuda (Kasuda & Archenbach, 1965). Για την εφαρμογή του μελετούμενου συστήματος επελέγη το στάδιο πρώτης ανάπτυξης των χοιριδίων. Στο στάδιο αυτό τα χοιρίδια εισάγονται στο θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών με βάρος 7kg περίπου. Ο στόχος που τίθεται είναι να παραμένουν στο συγκεκριμένο στάδιο για 5 εβδομάδες, μέχρι να αποκτήσουν βάρος περίπου 30kg. Το κτίριο πρώτης ανάπτυξης έχει δυνατότητα στέγασης 500 χοιριδίων. Ο ρυθμός παραγωγής είναι 100 χοιρίδια ανά εβδομάδα, για την ανάπτυξή τους δε από τα 7kg στα 30kg απαιτούνται 5 ημερολογιακές εβδομάδες (Παναγάκης, 2007). Η ανάπτυξη των χοιριδίων ξεκινάει σε θερμοκρασία 30° C και σχετική υγρασία 50%. Κάθε εβδομάδα η θερμοκρασία μειώνεται κατά 2° C, ενώ η σχετική υγρασία αυξάνεται κατά 2%. Τα χοιρίδια κατανέμονται σε 5 θαλάμους στους οποίους η θερμοκρασία ξηρού βολβού και η σχετική υγρασία εναλλάσσονται ως περιγράφεται στον πίνακα 1.

		<u>^</u> ۸		10000	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~ to p ti	10 1005			
	1ος		2ος 3ος 4ος		5ος					
Αριθμός	Συνδυαα	σμός	Συνδυαα	σμός	Συνδυα	σμός	Συνδυαα	σμός	Συνδυαα	σμός
θαλάμου	1η Εβδο	μάδα	2η Εβδο	μάδα	3η Εβδο	μάδα	4η Εβδο	μάδα	5η Εβδο	μάδα
	θ (°C)	RH	θ (°C)	RH	θ (°C) RH		θ (°C)	RH	θ (°C)	RH
1	30	50%	28	52%	26	54%	24	56%	22	58%
2	28	52%	26	54%	24	56%	22	58%	30	50%
3	26	54%	24	56%	22	58%	30	50%	28	52%
4	24	56%	22	58%	30	50%	28	52%	26	54%
5	22	58%	30	50%	28	52%	26	54%	24	56%

Πίνακας 1. Συνδυασμοί θαλάμων πρώτης ανάπτυξης και εναλλαγές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό τους

Οι θάλαμοι του κτηρίου ανάπτυξης κατασκευάζονται από μεταλλικά πλαίσια με πλήρωση πολυουρεθάνης. Ο ολικός συντελεστής θερμοπερατότητας των παρειών είναι 0,58W/m² °C ενώ της οροφής 0,54W/m² °C. Ο αντίστοιχος συντελεστής των διαφώτιστων οροφής είναι 2,90W/m² °C.

Υπολογίσθηκε το ισοζύγιο αισθητής θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού του χοιροστασίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και ο δυσμενέστερος ενεργειακά συνδυασμός θαλάμων για χειμώνα και θέρος. Οι υπολογισμοί του ενεργειακού ισοζυγίου των θαλάμων περιλαμβάνουν το θερμικό ισοζύγιο των χοιριδίων και τις απαιτήσεις σε αερισμό για την απομάκρυνση αισθητής, λανθάνουσας θερμότητας, και CO₂. Οι ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη υπολογίζονται με βάση τις δυσμενέστερες συνθήκες.

Μετά τον υπολογισμό της απαιτούμενης θερμικής και ψυκτικής ισχύος για τον κλιματισμό του κτηρίου, χαράχθηκαν οι κύκλοι θέρμανσης και ψύξης για τρία ψυκτικά ρευστά (R134a, R407A, R22). Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση λειτουργία της αντλίας θερμότητας για 18h ανά ημέρα. Παράλληλα υπολογίσθηκαν και οι σχετικές θερμοδυναμικές παράμετροι που απαιτούνται για τη διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε κλιματική περιοχή (Λαμπρινός, 2006). Τέλος υπολογίσθηκαν οι συνθήκες λειτουργίας του γεωεναλλάκτη για έδαφος φτωχό από πλευράς θερμοφυσικών ιδιοτήτων (ελαφρύ και ξηρό) με θερμική ροή 8W/m² και το συνολικό κόστος της εξεταζόμενης εγκατάστασης. Για την μελέτη του ερευνητικού μέρους χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά/υπολογιστικά πακέτα όπως MS Excel (Student version 7) όπου ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να επέμβει σε 14 παραμέτρους του μοντέλου, καθώς και τα πακέτα Cool Pack Version 1.46 και Math GV 32.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από την εξέταση των κλιματικών δεδομένων κάθε περιοχής προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον πίνακα 2.

		Χειμώνας	5 (5)		Θέρος	
Ψυχρομετρικά δεδομένα	Φλώρινα	Χαλκίδα	Ιεράπετρα	Φλώρινα	Χαλκίδα	Ιεράπετρα
Ελάχιστη/Μέγιστη ειδική ενθαλπία αέρα (kJ/kg)	3,22	15,94	18,97	86,87	91,44	94,58
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	-2,71	6,19	8,03	29,43	32,00	31,56
Απόλυτη υγρασία (kg/kg)	0,00230	0,00386	0,00433	0,02240	0,02316	0,02456
Εδικός όγκος αέρα (m3/kg)	0,83	0,80	0,80	0,96	0,90	0,90
Σχετική υγρασία RH (%)	73,18%	65,94%	65,14%	79,11%	76,33%	82,82%
Υψόμετρο (m)	680,00	10,00	10,00	680,00	10,00	10,00
Ατμοσφαιρική πίεση (kPa)	93,45	101,21	101,21	93,45	101,21	101,21

Πίνακας 2. Ψυχρομετρικά δεδομένα δυσμενέστερων κλιματικά περιόδων για τις τρείς περιοχές εγκατάστασης των θαλάμων πρώτης ανάπτυξης χοιριδίων

Από τη σχέση του Kasuda υπολογίσθηκε η κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους για τη θερμότερη και ψυχρότερη μέρα του εδάφους σε κάθε περιοχή. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κατανομή θερμοκρασίας εδάφους για τη ψυχρότερη μέρα του έτους (αριστερά) και τη θερμότερη μέρα (δεξιά) στις περιοχές εγκατάστασης των θαλάμων πρώτης ανάπτυξης

Ο υπολογισμός των αναγκών αερισμού των θαλάμων έδειξε ότι εκείνες που αφορούν την απομάκρυνση του CO_2 υπερτερούν σε σχέση με τις αντίστοιχες που απαιτούνται για την απομάκρυνση της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας. Στο σχήμα 2 δίδονται οι μεταβολές των θερμικών απωλειών και των αναγκών αερισμού για την απομάκρυνση του CO_2 σε συνάρτηση με τη μεταβολή του βάρους των χοιριδίων.



Σχήμα 2. Μεταβολή θερμικών απωλειών και ρυθμού αερισμού για την απομάκρυνση του CO_2 συναρτήσει του βάρους των χοιριδίων

Στο σχήμα 3 δίδονται οι συνολικές ανάγκες σε θέρμανση/ψύξη για κάθε θάλαμο και κάθε περιοχή. Οι αντίστοιχες συνολικές ανάγκες θέρμανσης/ψύξης για όλο το κτίριο και για κάθε περιοχή δίδονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 3. Συνολικές ανάγκες θέρμανσης (αριστερά) και ψύξης(δεξιά) για κάθε θάλαμο και κάθε περιοχή.



Σχ. 4. Συνολική ισχύς θέρμανσης/ψύξης του κτιρίου ανάπτυξης των χοιριδίων για κάθε περιοχή

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης ισχύος συμπυκνωτή και εξατμιστή για κάθε περιοχή και για τα τρία ψυκτικά ρευστά που εξετάστηκαν.

Πίνακας 3. Μέγιστη ισχύς συμπυκνωτή/εξατμιστή για κάθε περιοχή και για κάθε ψυκτικό

Ψυκτικά ρευστά	R-134a	R-407A	R-22							
		Φλώρινα								
Ισχύς εξατμιστή – χειμώνας (W)	67.712,33	68.225,21	68.742,40							
Ισχύς συμπυκνωτή – θέρος (W)	103.888,97	103.580,79	103.531,49							
		Χαλκίδα								
Ισχύς εξατμιστή – χειμώνας (W)	40.908,25	40.957,56	41.173,76							
Ισχύς συμπυκνωτή – θέρος (W)	121.692,80	121.478,29	121.435,87							
		Ιεράπετρα								
Ισχύς εξατμιστή – χειμώνας (W)	35.207,19	35.174,10	35.352,80							
Ισχύς συμπυκνωτή – θέρος (W)	128.983,71	128.787,30	128.536,78							

Η θεωρητική παροχή όγκου του συμπιεστή καθώς και το ειδικό ογκομετρούμενο έργο, που καθορίζουν το μέγεθος του συμπιεστή, δίδονται αντίστοιχα για κάθε περιοχή και κάθε ψ.ρευστό στους πίνακες 4 και 5. Οι αντίστοιχοι συντελεστές θερμικής και ψυκτικής συμπεριφοράς για κάθε περιοχή παρουσιάζονται συγκριτικά στο σχήμα 6.

Περιοχές	Φλώρινα				Χαλκίδα		Ιεράπετρα		
Ψυκτικά ρευστά	R-134a	R-407A	R-22	R-134a	R-407A	R-22	R-134a	R-407A	R-22
Θεωρητική παροχή όγκου (m³/s) Χειμώνας	0,0511	0,0310	0,0298	0,0226	0,0139	0,0138	0,0184	0,0115	0,0113
Θεωρητική παροχή όγκου Vth (m³/s) Θέρος	0,0330	0,0205	0,0214	0,0403	0,0251	0,0259	0,0430	0,0268	0,0275

Πίνακας 4. Θεωρητική παροχή όγκου για κάθε περιοχή και κάθε ψυκτικό ρευστό

TT/ /	D C /	,	,	10	,	, ,
Πηλακάς Σ	EINKO O	νκομετοού	11580 5080	י אומ גמאצ	π eolovn kai	WUKTIKO OEUGTO
IIII and J.	LIUIKO U	πομοιρου	mere opr		nopiolij kul	ψ or the provide

Περιοχές	Φλώρινα			Χαλκίδα			Ιεράπετρα		
Ψυκτικά ρευστά	R-134a	R-407A	R-22	R-134a	R-407A	R-22	R-134a	R-407A	R-22
Ειδικό θερμικό ογκομετρούμενο έργο χειμώνα (kJ/m ³)	2.205,21	3.525,83	3.593,11	2.682,67	4.297,29	4.253,00	2.782,78	4.378,09	4.415,83
Ειδικό ψυκτικό ογκομετρούμενο έργο θέρους (kJ/m³)	3.195,93	5.096,05	4.861,00	3.048,98	4.836,05	4.670,50	3.024,41	4.791,84	4.638,50





Ο υπολογισμός των οικονομικών μεγεθών του συστήματος πραγματοποιήθηκε για το χοιροστάσιο της Χαλκίδας. Εξετάστηκαν τρεις ομάδες δαπανών οι οποίες περιελάμβαναν το κτίριο με τον βασικό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, την αντλία θερμότητας και το γεωεναλλάκτη. Ο υπολογισμός έδειξε ότι το κόστος της αντλίας θερμότητας αντιστοιχεί στο 14% των συνολικών δαπανών. Οι δαπάνες κατασκευής του κτιρίου καλύπτουν το 40% του κόστους, τα ηλεκτρολογικά 5%, ενώ το υπόλοιπο αφορά δαπάνες του γεωεναλλάκτη. Το συνολικό κόστος ενός τέτοιου κτηρίου ανάπτυξης με πλήρη εξοπλισμό κυμαίνεται μεταξύ 350.000 και 400.000 Ευρώ. Ο χρόνος απόσβεσης του εξοπλισμού εκτιμάται μεταξύ 8 ετών (κακής ποιότητας έδαφος με θερμική ροή 8 W/m^2) και 5 ετών (καλής ποιότητας έδαφος θερμικής ροής 32 W/m^2).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σύγκριση των φορτίων των θαλάμων των χοιριδίων δείχνει ότι πάντοτε τις μεγαλύτερες ανάγκες σε θέρμανση ή ψύξη παρουσιάζουν οι μεγαλύτερες ηλικίες (12-14kW θέρμανση και 21-23kW ψύξη). Από τη μελέτη διαπιστώθηκε πως η μονάδα της Φλώρινας παρουσιάζει τα μεγαλύτερα φορτία θέρμανσης το χειμώνα έναντι της Χαλκίδας και της Ιεράπετρας. Η μονάδα της Ιεράπετρας παρουσιάζει τα μεγαλύτερα φορτία ψύξης το θέρος έναντι της Φλώρινας και της Χαλκίδας. Και στις τρεις περιοχές τα φορτία θέρους υπερτερούν των αντιστοίχων φορτίων χειμώνα. Αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης είναι του γεωεναλλάκτη να γίνεται σε κάθε περιοχή με βάση τις ανάγκες θέρους. Οι κύκλοι παρουσιάζουν συντελεστή θερμικής συμπεριφοράς κυμαινόμενο από 3,2 (Φλώρινα) έως 4,6 (Ιεράπετρα).

Μεταξύ των τριών ψυκτικών ρευστών R134a, R407A και R22, την καλύτερη απόδοση παρουσιάζει το καταργούμενο R22.

Η διαστασιολόγηση της ψυκτικής εγκατάστασης (μέγεθος συμπιεστή) στη Φλώρινα γίνεται με βάση τον κύκλο του χειμώνα ενώ στις άλλες πόλεις με βάση τον θερινό ψυκτικό κύκλο. Ο συμπιεστής στη Φλώρινα τελικά είναι ελάχιστα μεγαλύτερος (20-25%) σε θεωρητική παροχή όγκου από τον αντίστοιχο στην Χαλκίδα και την Ιεράπετρα. Η ισχύς του εξατμιστή και του συμπυκνωτή εξαρτώνται περισσότερο από τα φορτία και λιγότερο από το χρησιμοποιημένο ψυκτικό ρευστό. Σε ό,τι αφορά τον γεωεναλλάκτη, η θερμοκρασία του εδάφους αρχίζει να σταθεροποιείται από το βάθος του 1m. Σε βάθος 2m η σταθερή θερμοκρασία στη Φλώρινα είναι 12° C ενώ στη Χαλκίδα και την Ιεράπετρα 18° C και 19° C αντίστοιχα. Τέλος ο χρόνος απόσβεσης του εξοπλισμού κλιματισμού, ανάλογα με τη ποιότητα του εδάφους, εκτιμάται από 5 έως 8 έτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Deglin, D., Caenegem, L. V., & Dehon, P. (1999). Subsoil Heat Exchangers for the Air Conditioning of Livestock Buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73, $\sigma\sigma$. 179 - 188.

Diener, R. G., Avery, J. F., Moseley, J. L., & McNeer, M. L. (1986). Analysis of an Underground Heat Exchanger for Poultry Buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 34, oo. 187 - 108.

Healy, P. F., & Ugursal, P. F. (1997). Performance and Economic Feasibility of Ground Source Heat Pumps in Cold Climate. *International Journal of Energy Research* (vol. 21), σσ. 857 - 870.

Leong, W. H., Tarnawski, V. R., & Aittomaki, A. (1998). Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance. *International Journal of Refrigeration*, *Vol.* 21 (8), $\sigma\sigma$. 595 - 606.

Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2007). A parametrical Assessment Study on the Energetic & Exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump used for heating a greenhouse. *Building and Environment* (vol. 42), $\sigma\sigma$. 11 - 24.

Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2005). Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump: an experimental study. (1. 1050, $E\pi\mu$.) *Building and Environment*, vol. 40.

Λαμπρινός, Γρ. (1990), Εφαρμογή της Ψύξης στη Γεωργία, Παραδόσεις ΓΠΑ σ. 299.

Λαμπρινός, Γρ. (2006), Θερμικές και Ψυκτικές Μηχανές – Μέρος ΙΙ:Ψυκτικές Μηχανές,. Ηλεκτρονικές Σημειώσεις,: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, σ. 41. Παναγάκης, Π. (2009). Τεχνητό Περιβάλλον Στέγασης Αγροτικών Ζώων. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Παναγάκης, Π. (2007). ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΑ, Τεχνητό Περιβάλλον, Σχεδιασμός & Οργάνωση Χώρων, Κατασκευές & Εξοπλισμός. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΤΙΡΩΝ

Ι.Φ. Παπαγεωργίου και Γρ. Λαμπρινός

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Α.Φ.Π. & Γ.Μ., Ιερά Οδός 75, T.K. 11855, Αθήνα, Τηλ. 210 529 4029–4031, Fax. 210 529 4032, e-mail: ypvar@hotmail.com; refrigenergy@aua.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται ο σχεδιασμός, η διαστασιολόγηση και η κοστολόγηση γεωεναλλάκτη αντλίας θερμότητας που μπορεί να κλιματίσει μια χοιροτροφική μονάδα χοιριδίων πρώτου σταδίου ανάπτυξης σε τρεις διαφορετικές Ελληνικές κλιματικές ζώνες (Φλώρινα, Χαλκίδα, Ιεράπετρα). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σύσταση και το υγρασιακό δυναμικό (περιεχόμενο) του εδάφους σε συνδυασμό με την επιλεγείσα γεωμετρία του γεωεναλλάκτη αποτελούν καθοριστικό παράγοντα τόσο για τη συνολικά απαιτούμενη επιφάνειά του όσο και για το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

Λέζεις κλειδιά: Αβαθής γεωθερμία, αντλία θερμότητας, γεωβοηθούμενη αντλία θερμότητας.

DESIGN, DIMENSIONING AND COST ESTIMATION OF GROUND LOOP FOR GROUND COUPLED HEAT PUMP USED FOR HEATING AND COOLING OF AGRICULTURAL BUILDING

Y.F. Papageorgiou and Gr. Lambrinos

Agricultural University of Athens, Dep. of N.R.M. & A.E., Lab. of Agricultural Engineering, 75 Iera Odos Str., Athens, Greece 11855, tel. +3 210 5294031, fax. +3 210 5294032, e-mail: ypvar@yahoo.gr; refrigenergy@aua.gr.

ABSTRACT

In the present study is investigated, the design, the dimensioning and the installation cost of a ground heat exchanger used in a ground coupled heat pump for heating and cooling of a livestock building (ex. pig house) located in three different Greek climatic zones (Florina, Halkida, Ierapetra). The results showed that soil composition and moisture potential (content) combined with the geometry of the ground heat exchanger are crucial factors for the total surface needed for the laying and the corresponding cost of the system.

Key words: Geothermal energy, earth energy, soil, heat pump, ground coupled heat pump.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση του εδάφους σε εφαρμογές γεωβοηθούμενων αντλιών θερμότητας προϋποθέτει γνώση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του πρώτου προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική και οικονομική αξιοποίηση του θερμικού του δυναμικού. Το βασική στοιχείο στο σχεδιασμό ενός γεωεναλλάκτη αφορά τον υπολογισμό του εδαφικού βάθους στο οποίο σταθεροποιείται η θερμοκρασία. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους δίνεται από τη σχέση του Kasuda (Kasuda & Archenbach, 1965) σύμφωνα με την σχέση (1):

$$T_{g}(X_{s},t) = \overline{T_{g}} - A_{s} e^{\left(-X_{s}\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right)} \cos\left\{\frac{2\pi}{365}\left[t - t_{o} - \frac{X_{s}}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right]\right\}$$
(1)

Όπου:

 T_{g} = το πλάτος της θερμοκρασία του εδάφους

 $X_s =$ το βάθος του εδάφους σε m

 A_s = το εύρος της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους σε $^{\circ}C$

 $\alpha = \eta$ θερμική διαχυτότητα σε m²/day

t = η ημέρα του έτους (1 – 365)

 $t_o = η$ σταθερά φάσης εκφρασμένη σε ημέρες

Στην παραπάνω σχέση ο παράγων "α" εξαρτάται από τη σύσταση, τη δομή του εδάφους και το υγρασιακό περιεχόμενό του. Η υγρασία επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη θερμική συμπεριφορά του εδάφους και κατ' επέκταση την απόδοση της γεωβοηθούμενης αντλίας θερμότητας (Leong et al, 1998). Από τις μέχρι τώρα μελέτες καθώς και από τη διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν στην αγορά των γεωβοηθούμενων αντλιών θερμότητας διαπιστώνεται πως η διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς του εδάφους παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι στις περιοχές όπου σχεδιάζεται η εγκατάσταση δεν υπάρχουν πάντοτε διαθέσιμα δεδομένα, τα οποία θα επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό των εδαφικών συνθηκών που θα ληφθούν υπ' όψιν στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση ενός γεωεναλλάκτη.

Εκτιμήσεις σχετικά με ένα πολύ καλό έδαφος μπορεί να οδηγήσουν σε υποδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη. Αντιθέτως, εκτιμήσεις σχετικές με ένα πτωχό θερμοφυσικά έδαφος οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη και αύξηση του κόστους της εγκατάστασης (ASHRAE, 2007). Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός γεωεναλλάκτη υπό την παραδοχή ενός φτωχού εδάφους από πλευράς θερμοφυσικών ιδιοτήτων ώστε να διαπιστωθεί το μέγιστο δυνατό μέγεθος που μπορεί να λάβει ο γεωεναλλάκτης και να εκτιμηθεί το κόστος εγκατάστασής του. Ο μελετούμενος γεωεναλλάκτης εντάσσεται σε σύστημα αντλίας θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται για κλιματισμό χοιροστασίου (Παπαγεωργίου & Λαμπρινός, 2011), το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε τρεις διαφορετικές κλιματικά περιοχές της Ελληνικής επικράτειας (Φλώρινα, Χαλκίδα, Ιεράπετρα)

2. ΥΛΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΣ & ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Ο γεωεναλλάκτης περιλαμβάνει κλειστό κύκλωμα στο οποίο κυκλοφορεί θερμομεταφορικό μέσο (διάλυμα προπυλενογλυκόλης), το οποίο εναλλάσσει θερμότητα με το έδαφος. Η κυκλοφορία του θερμομεταφορικού υγρού γίνεται με τη χρήση ηλεκτροκίνητης αντλίας. Το κύκλωμα του γεωεναλλάκτη περιλαμβάνει μια γραμμή διανομής και μια επιστροφής. Από τον γραμμή διανομής το θερμομεταφορικό ρευστό μεταφέρεται στους επιμέρους κλάδους όπου πραγματοποιείται η ανταλλαγή



θερμότητας με το έδαφος. Κάθε κλάδος αποτελείται από δύο ισομήκη τμήματα, ένα προσαγωγής και ένα απαγωγής (σχήμα 1).

Σχήμα 1. Διάταξη κλάδων προσαγωγής και απαγωγής γεωεναλλάκτη

Για να σχεδιαστεί και να διαστασιολογηθεί ο γεωεναλλάκτης απαιτείται κατ' αρχάς ο υπολογισμός φορτίων θέρμανσης/ψύξης του κτιρίου στέγασης χοιριδίων. Στην παρούσα εργασία τα φορτία θέρμανσης/ψύξης λαμβάνονται από εργασία που πραγματοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση αντλίας θερμότητας σε συγκεκριμένο τύπο χοιροστασίου και για τρία ψυκτικά ρευστά (R134a, R22, R407A) στις περιοχές Φλώρινας, Χαλκίδας και Ιεράπετρας (Παπαγεωργίου & Λαμπρινός, 2011). Με βάση τα υπολογισθέντα φορτία θέρμανσης και ψύξης διαστασιολογείται ο γεωεναλλάκτης και υπολογίζεται το κόστος εγκατάστασής του. Αναλυτικότερα το σκέλος αυτό των υπολογισμών περιλαμβάνει:

i. <u>Υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους</u>.

Η θερμοκρασία του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος εκτιμάται με τη σχέση του Kasuda. Στόχος των σχετικών υπολογισμών είναι να διαπιστωθεί το βάθος στο οποίο παρατηρείται πρακτικά σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σε κάθε περιοχή θεωρούμε ότι το έδαφος είναι βαρύ και ξηρό. Η τιμή της θερμικής διαχυτότητας για το συγκεκριμένο τύπο εδάφους είναι χαμηλή ίση με 0,047m²/day και η θερμική ροή προς τον εναλλάκτη η ελάχιστη, ίση με 8W/m² (ASHRAE, 2007).

ii. <u>Υπολογισμός ισχύος γεωεναλλάκτη</u>

Οι τιμές της ισχύος (θερμικής/ψυκτικής) του γεωεναλλάκτη υπολογίστηκαν μετά τη χάραξη των θερμοδυναμικών κύκλων των τριών ψυκτικών ρευστών.

iii. <u>Υπολογισμός επιφάνειας γεωεναλλάκτη</u>

Ο υπολογισμός της επιφάνειας του γεωεναλλάκτη γίνεται με βάση την ισχύ του και την θερμική ροή για τον επιλεγέντα τύπο εδάφους. Ο τύπος του εδάφους που επιλέξαμε είναι ποιοτικά ο χειρότερος με θερμική ροή της τάξεως των 8W/m².

iv. <u>Επιλογή υλικού κατασκευής και γεωμετρίας γεωεναλλάκτη</u>

Το υλικό κατασκευής που επιλέγεται είναι σκληρό πολυαιθυλένιο τύπου PE-XA της εταιρείας Rehau. Με βάση τη συνολική επιφάνεια του γεωεναλλάκτη επιλέγουμε γεωμετρία η οποία αφ' ενός μεν απαιτεί την ελάχιστη δυνατή έκταση εγκατάστασης ενώ παράλληλα διασφαλίζει ομοιόμορφη πτώση πίεσης σε όλα τα τμήματα του.

ν. <u>Επιλογή θερμομεταφορικού μέσου και υδραυλικοί υπολογισμοί</u>

Το θερμομεταφορικό μέσο που επιλέγεται είναι προπυλενογλυκόλη 30% κ.β. Οι υδραυλικοί υπολογισμοί περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των απωλειών μανομετρικού ύψους και της παροχής που απαιτείται για τις απαιτούμενες θερμικές εναλλαγές μεταξύ θερμομεταφορικού μέσου και εδάφους. Από τους υδραυλικούς υπολογισμούς διαστασιολογείται και η αντλία που χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία του θερμομεταφορικού μέσου στο γεωεναλλάκτη. Οι σωληνώσεις των κλάδων του γεωεναλλάκτη είναι διαστάσεων 20x1,9mm. Η εσωτερική διάμετρος τους είναι ο,0162m. Η εσωτερική διάμετρος των κεντρικών σωληνώσεων διανομής και επιστροφής του θερμομεταφορικού ρευστού είναι ίση προς 0,10m, ενώ το βάθος τοποθέτησης των σωληνώσεων αυτών είναι 2,0m με ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση 0,75m.

vi. Υπολογισμός κόστους εγκατάστασης και αζιολόγηση επένδυσης

Ο υπολογισμός του κόστους περιλαμβάνει διαχωρισμό των δαπανών σε τέσσερες ομάδες οι οποίες είναι το κτίριο στέγασης χοιριδίων, η αντλία θερμότητας, τα ηλεκτρολογικά με τους αυτοματισμούς και ο γεωεναλλάκτης.

Το σύνολο των αλγεβρικών υπολογισμών πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστικό μοντέλο το οποίο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Ms excel (Student version 7). Ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να επέμβει σε 14 παραμέτρους του μοντέλου. Για τη χάραξη και την επεξεργασία των κύκλων των ψυκτικών ρευστών της αντλίας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Cool Pack Version 1.46. Για τη χάραξη του τρισδιάστατου διαγράμματος που παριστάνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους και της ημέρας του έτους χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Math GV 32.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τη σχέση του Kasuda υπολογίσθηκε η κατανομή της θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους για τη θερμότερη και ψυχρότερη μέρα του έτους σε κάθε περιοχή. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Κατανομή θερμοκρασίας εδάφους για τη ψυχρότερη μέρα του έτους (αριστερά) και τη θερμότερη μέρα (δεξιά) στις περιοχές εγκατάστασης των θαλάμων πρώτης ανάπτυξης

Οι τιμές της ισχύος του γεωεναλλάκτη για κάθε εποχή, περιοχή και ψυκτικό ρευστό δίδονται στον σχήμα 3. Κατά το θέρος ο γεωεναλλάκτης λειτουργεί ως ψύκτης του συμπυκνωτή, ενώ κατά το χειμώνα προσφέρει θερμότητα στον εξατμιστή.



Σχήμα 3. Ισχύς συμπυκνωτή(θέρος) και εξατμιστή(χειμώνα) για κάθε περιοχή και για κάθε ψυκτικό ρευστό

Από τα αποτελέσματα του σχήματος 3 διαπιστώνεται ότι η ισχύς θερμότητας που αποβάλλεται το θέρος είναι μεγαλύτερη από αυτή που προσλαμβάνεται κατά τον χειμώνα από το έδαφος, σε κάθε περιοχή και για κάθε ψυκτικό ρευστό.

Η επιφάνεια του γεωεναλλάκτη υπολογίζεται διαιρώντας την ισχύ θέρους με την εκτιμώμενη θερμική ροή του επιλεγέντος τύπου εδάφους. Λαμβάνοντας ως μέση απόσταση μεταξύ των κλάδων του γεωεναλλάκτη τα 0,75m (Rehau, 2008) υπολογίζουμε το συνολικό μήκος σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη. Τα αποτελέσματα δίδονται στον πίνακα 1.

			Ψυκτικά	ά ρευστά			
	R-134a R-407A R-22 R-134a R-407A					R-22	
	Επιφάν	εια γεωεναλλάι	κτη (m²)	Μήκος σωληνώσεων (m)			
Φλώρινα	12.986,12	12.947,60	12.941,44	17.314,83	17.263,46	17.255,25	
Χαλκίδα	15.211,60	15.184,79	15.179,48	20.282,13	20.246,38	20.239,31	
Ιεράπετρα	16.122,96	16.098,41	16.067,10	21.497,28	21.464,55	21.422,80	

Πίνακας 1. Επιφάνειες και συνολικό μήκος σωληνώσεων γεωεναλλάκτη

Για την αποφυγή υψηλής πτώσεως πίεσης περιορίζουμε το μέγιστο μήκος ανά κλάδο στα 100m. Ως εκ τούτου ο συνολικός αριθμός κλάδων προκύπτει διαιρώντας το συνολικό μήκος σωληνώσεων δια του 100. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνολικός αριθμός δεν επηρεάζεται από την επιλογή του ψυκτικού ρευστού που χρησιμοποιείται στην αντλία θερμότητας για κάθε περιοχή. Στη Φλώρινα υπολογίζονται 174 κλάδοι, στη Χαλκίδα 204 ενώ στην Ιεράπετρα 216. Η συνολικά απαιτούμενη οικοπεδική επιφάνεια εγκατάστασης του γεωεναλλάκτη υπολογίζεται από τη σχέση:

 $E_{tot} = (n_{\kappa} \times 2) \times 0,75 \times 100$

(2)

Όπου:

 $E_{tot} =$ συνολική οικοπεδική επιφάνεια εγκατάστασης (m²)

 $n_{\kappa} = \sigma$ υνολικός αριθμός κλάδων

Σε κάθε περίπτωση το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται προς τα άνω και τον πλησιέστερο άρτιο αριθμό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την Φλώρινα απαιτείται οικοπεδική επιφάνεια ίση προς 26.100m², τη Χαλκίδα 30.600m² και την Ιεράπετρα 32.400m². Η συνολική επιφάνεια μπορεί να μειωθεί αν αντί της τοποθέτησης των κλάδων προσαγωγής – απαγωγής στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο τοποθετηθούν στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο. Συγκεκριμένα ο κλάδος προσαγωγής τοποθετείται σε βάθος 2,4m ενώ ο κλάδος απαγωγής σε βάθος 1,6m πάνω από τον κλάδο προσαγωγής. Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη πτώση πίεσης σε όλους τους κλάδους, ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

Μοιράζουμε τους κλάδους σε δύο πλευρές με ίσο αριθμό κλάδων στην κάθε πλευρά. Αριθμούμε τους κλάδους ξεκινώντας από τον αριθμό «1» στον πρώτο κλάδο της μιας πλευράς μέχρι τον αριθμό «n». Για παράδειγμα στον γεωεναλλάκτη της Φλώρινας έχουμε n = 174. Συνδέουμε την απαγωγή του κλάδου No. 1 (σχήμα 1) με την αρχή του σωλήνα διανομής. Συνεχίζουμε διαδοχικά τις συνδέσεις των απαγωγών των υπολοίπων κλάδων της ιδίας πλευράς. Στο τέλος της πλευράς ο σωλήνας διανομής κάνει καμπύλη 180° και συνεχίζει ώστε πάνω του να συνδεθούν οι υπόλοιποι κλάδοι της διπλανής πλευράς μέχρι και τον τελικό κλάδο. Συνδέουμε το σωλήνα επιστροφής ξεκινώντας με πρώτο τον τελευταίο από τους κλάδους. Για παράδειγμα στη Φλώρινα συνδέουμε το σωλήνα επιστροφής ξεκινώντας από τον κλάδο με n = 174. Συνεγίσουμε διαδοχικά τις συνδέσεις του σωλήνα επιστροφής με τις προσαγωγές των κλάδων κατά την αντίθετη φορά δηλαδή από n = 174 μέχρι n = 1. Με την κατακόρυφη τοποθέτηση καταφέρνουμε να μειώσουμε τη συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια κάθε περιοχής κατά 50%. Έτσι στη Φλώρινα η συνολική επιφάνεια διαμορφώνεται σε 13.050m², στη Χαλκίδα 15.300m² και στην Ιεράπετρα 17.200m². Οι υπολογισμοί της ογκομετρικής παροχής και του συνολικού όγκου του θερμομεταφορικού ρευστού δίνονται στον πίνακα 2.

		Φλώρινα			Χαλκίδα			Ιεράπετρα		
Ψυκτικά ρευστά	R134a	R407a	R22	R134a	R407a	R22	R134a	R407a	R22	
Ογκομετρική παροχή (m³/h)	14,46	14,41	14,41	16,93	16,90	16,90	17,95	17,92	17,89	
Συνολικός όγκος θ/κου ρευστού (m ³)	7,76	7,76	7,76	9,09	9,09	9,09	9,62	9,62	9,62	

Πίνακας 2. Υδραυλικοί υπολογισμοί κυκλωμάτων γεωεναλλάκτη για κάθε περιοχή

Για την κοστολόγηση του έργου λαμβάνονται υπ' όψιν τα δεδομένα του χοιροστασίου στη Χαλκίδα. Η κοστολόγηση βασίζεται στις δαπάνες αγοράς εξοπλισμού και των απαιτούμενων εργατικών εγκατάστασης. Οι σχετικές πληροφορίες συνελλέγησαν από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην πώληση και τοποθέτηση συστημάτων κλιματισμού καθώς και από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα πώλησης και εγκατάστασης γεωθερμικών αντλιών. Επιπλέον συνελλέγησαν πληροφορίες σχετικά με το κόστος κατασκευής των θαλάμων πρώτης ανάπτυξης καθώς επίσης και πληροφορίες σχετικές με εργασίες εκσκαφής του χώρου στον οποίο εγκαθίσταται ο γεωεναλλάκτης.

Το κόστος της εγκατάστασης χωρίστηκε σε τέσσερες ομάδες. Στην πρώτη ομάδα συμπεριελήφθησαν οι δαπάνες ανέγερσης κτιρίου και τοποθέτησης του βασικού του εξοπλισμού. Στη δεύτερη ομάδα συμπεριελήφθη η δαπάνη αγοράς και τοποθέτησης της αντλίας θερμότητας, στην τρίτη τα ηλεκτρολογικά και οι αυτοματισμοί και τέλος στην τέταρτη οι δαπάνες εκσκαφής και εγκατάστασης του γεωεναλλάκτη.

Η επένδυση αξιολογήθηκε σε σύγκριση με αντίστοιχη εγκατάσταση που περιλαμβάνει αερόθερμα για την απαιτούμενη θέρμανση το χειμώνα και εξατμιστικό σύστημα δροσισμού (διαβρεχόμενες παρειές) κατά το θέρος. Κατά την σύγκριση των δύο λύσεων ελήφθησαν υπ' όψιν και οι πιθανές απώλειες ζωικού κεφαλαίου που μπορεί να εμφανισθούν το θέρος στην εναλλακτική εγκατάσταση συνεπεία των μη ελεγχόμενων πλήρως συνθηκών στέγασης (Παναγάκης, 2007). Επιπλέον ελήφθησαν υπ' όψιν τα εξής στοιχεία:

- Κόστος χρήματος 3%
- Ετήσιες δαπάνες συντήρησης γεωθερμικής αντλίας € 800
- Μέσο κόστος κιλοβατώρας αγροτικής χρήσεως € 0,04
- Μέσο κόστος € 0,70 ανά κιλό για κάθε χοίρο προς πώληση και με μέσο βάρος 100kg
- Εύρος ζωής της επένδυσης 20 (κτήρια) και 12 έτη (εξοπλισμός)
- Μηδενική υπολειμματική αξία επένδυσης στο τέλος της ζωής της.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4. παρουσιάζεται ο χρόνος επιστροφής κεφαλαίου για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη θεωρούμε ότι το έδαφος είναι φτωχό από πλευράς θερμοφυσικών ιδιοτήτων με θερμική ροή 8W/m². Στη δεύτερη περίπτωση θεωρούμε ότι έχουμε ένα καλό έδαφος από πλευράς θερμοφυσικών ιδιοτήτων με θερμική ροή 25W/m². Διαπιστώνεται ότι σ' ένα καλό έδαφος ο χρόνος απόσβεσης μπορεί να μειωθεί πρακτικά στο ήμισυ.



Σχήμα 4. Μεταβολή της περιόδου επιστροφής κεφαλαίου για δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε κάθε περιοχή η θερμοκρασία εδάφους από τα 2,0m βάθος και πλέον παραμένει συνεχώς σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Για την δυσμενέστερη θερμοφυσικά κατηγορία εδάφους σε βάθος 2m η σταθερή θερμοκρασία στη Φλώρινα είναι 12° C ενώ στη Χαλκίδα και την Ιεράπετρα 18° C και 19° C αντίστοιχα. Η Ιεράπετρα απαιτεί τις μεγαλύτερες αναγκαίες παροχές που φθάνουν τα 18m³/h (θέρος) ενώ η Φλώρινα τις μικρότερες παροχές 14,4 m^3 /h. Οι αντίστοιχες παροχές το χειμώνα είναι 4,9 m^3 /h στην Ιεράπετρα και 9,4m³/h στη Φλώρινα. Το μήκος του γεωεναλλάκτη και η αντίστοιχη απαιτούμενη επιφάνεια εδάφους καθορίζονται από τις ανάγκες θέρους σε όλες τις περιοχές της Ελλάδας και κυμαίνονται αντίστοιχα από 21,5km ή 16 στρέμματα στην Ιεράπετρα έως 17,3km ή 13 στρέμματα στη Φλώρινα. Οι διαστάσεις του γεωεναλλάκτη δεν επηρεάζονται από το ψυκτικό ρευστό που χρησιμοποιείται στην αντλία θερμότητας. Από τα οικονομικά μεγέθη του χοιροστασίου της Χαλκίδας πάνω στο οποίο βασίσθηκε η οικονομική αξιολόγηση, προέκυψε πως το κόστος του γεωεναλλάκτη αντιστοιχεί περίπου στο 40% του συνολικού κόστους επένδυσης ενώ το κόστος της αντλίας θερμότητας στο 15%. Η αύξηση της θερμικής ροής του εδάφους επιφέρει μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας και του χρόνου απόσβεσης της εγκατάστασης κατά 50% περίπου. Από τις τέσσερες κατηγορίες δαπανών της επένδυσης διαπιστώνεται πως εκείνη του γεωεναλλάκτη παρουσιάζει ελαστικότητα, η οποία εξαρτάται τόσο από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους όσο και από τον σχεδιασμό του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASHRAE. (2007). HVAC Applications (Vol. 32).

Kasuda, T., & Archenbach, P. R. (1965). Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. *ASHRAE Transactions*, *Vol 71*, Leong, W. H., Tarnawski, V. R., & Aittomaki, A. (1998). Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance. *International Journal of Refrigeration*, *Vol. 21* (8), pp. 595 - 606.

Rehau. (2008). REHAU RAUGEO, Technical information 827.600.

Παναγάκης, Π. (2007). ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΑ, Τεχνητό Περιβάλλον, Σχεδιασμός & Οργάνωση Χώρων, Κατασκευές & Εξοπλισμός, Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, σ. 3
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΑΜΦΙΡΡΙΚΤΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Χ.Α. Κατσαΐτη, Δ.Λ. Κατέρης, Γ.Κ. Ντίνας, Β.Π. Φράγκος, Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη e-mail: <u>catsaiti@gmail.com</u>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται αριθμητικά η τυρβώδης ροή του αέρα επάνω από μία τυπική αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή. Η προσομοίωση της ροής προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, προσομοιώνεται η ροή μέσα σε αεροσήραγγα. Η κατασκευή καταλαμβάνει όλο το πλάτος της αεροσήραγγας ώστε το αριθμητικό πείραμα να υπολογίζεται σε δύο διαστάσεις. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν τις στιγμιαίες γραμμές ροής και τις στιγμιαίες ταχύτητες του αέρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Λέζεις κλειδιά: αμφίρρικτες αγροτικές κατασκευές, εξισώσεις Navier-Stokes, ασταθής αριθμητική προσομοίωση.

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT AIRFLOW OVER A PITCHED-ROOF AGRICULTURAL STRUCTURE

C.A. Katsaiti, D.L. Kateris, G.K. Ntinas, V.P. Fragos, Ch. Nikita-Martzopoulou

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece e-mail: <u>catsaiti@gmail.com</u>

ABSTRACT

This study presents numerically the turbulent airflow over a typical pitched-roof agricultural structure. The airflow simulation is based on the solution of the Navier-Stokes equations and continuity equation with the finite element method. Taking into account the proper boundary conditions the airflow is simulated into a wind-tunnel. The structure occupies the total width of the wind tunnel. Therefore the numerical experiment is approximated as two-dimensional. The presented results include the instantaneous stream-lines of air flow and the instantaneous values of air velocity at different time instants.

Key words: pitched-roof agricultural structures, Navier-Stokes equations, unsteady numerical simulation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο παγκοσμίως με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό ανάπτυξης. Η συνεχής ανάπτυξη του αγροτικού τομέα οδήγησε μεταξύ άλλων και στην αύξηση των αγροτικών κατασκευών. Η ροή του αέρα πάνω και γύρω από αγροτικές κατασκευές παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω των επιδράσεων τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό περιβάλλον των κατασκευών. Η διερεύνηση της ροής του αέρα μπορεί να γίνει πειραματικά, σε πραγματικής κλίμακας κατασκευές αλλά και εργαστηριακά, σε αεροσήραγγες με κατασκευές υπό κλίμακα. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα έχει στραφεί στην αριθμητική προσομοίωση της ροής, λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Ο άνεμος κατατάσσεται στις μεταβλητές φορτίσεις που δρουν επάνω στις κατασκευές. Αποτελεί έναν πολύ κρίσιμο παράγοντα βάσει του οποίου γίνεται η διαστασιολόγηση μιας οποιασδήποτε αγροτικής κατασκευής. Η διεύθυνση, η φορά και η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά. Οι αναπτυσσόμενες πιέσεις στις επιφάνειες προκαλούν δυνάμεις κάθετες στις επιφάνειες των δομημάτων ικανές να φορτίσουν την κατασκευή σε σημαντικό βαθμό (Νικήτα-Μαρτζοπούλου, 2006).

Η σημερινή εποχή επιτάσσει τη μελέτη της ροής του ανέμου γύρω από τις αγροτικές κατασκευές λόγω των πρακτικών εφαρμογών του φαινομένου. Η διερεύνηση θεωρείται απαραίτητη διότι η ανάπτυξη των αγροτικών κατασκευών αποτελεί έναν τρόπο εκμετάλλευσης της γης και κατέχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των φυσικών πόρων καθώς και στην κοινωνική συνοχή και οικονομική επιβίωση των αγροτικών περιοχών, πολλώ δε μάλλον στην Ελλάδα χώρα αμιγώς γεωργική.

Λόγω της πρακτικής σημασίας του φαινομένου πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση της ροής του αέρα γύρω από κατασκευές, προσεγγίζοντας τη με διαφορετικούς τρόπους. Οι Wells et al. (1980) μελέτησαν πειραματικά τα φορτία του αέρα επάνω από 5 διαφορετικού τύπου αμφίρρικτα θερμοκήπια, μέσω πειραματικής διαδικασίας. Οι Shklyar et al. (2004) επεξεργάστηκαν με αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης τις τρισδιάστατες ροές μάζας του αέρα πάνω από αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, μέσω αριθμητικής λύσης. Επίσης, οι Reichrath et al. (2002) προσομοίωσαν και επαλήθευσαν την κατανομή της πίεσης του αέρα στην οροφή ενός αμφίρρικτου θερμοκηπίου εμπορικής χρήσεως, τύπου Venlo. Οι Ould Khaoua et al. (2006) μελέτησαν την επίδραση του εξωτερικού αέρα στον αερισμό ενός θερμοκηπίου, με τη βοήθεια αριθμητικής επίλυσης. Οι Fragos et al. (2005) και οι Psychoudaki et al (2005) μελέτησαν τη ροή του αέρα πάνω από εμπόδια, με δυναμική προσέγγιση. Κρίνεται απαραίτητο να συνεχιστεί η προσπάθεια συγκέντρωσης περισσότερων αποτελεσμάτων, για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της τυρβώδους ροής γύρω από αγροτικές κατασκευές

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δισδιάστατη, τυρβώδης ροή του αέρα γύρω από αμφίρρικτη κατασκευή με την απευθείας επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας, για αριθμό Reynolds, *Re*=700. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με βάση το χρόνο, χωρίς παραδοχές. Η δισδιάστατη προσέγγιση χρησιμοποιείται ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος καθώς και γιατί προκύπτει λεπτομερέστερο υπολογιστικό πεδίο (Chiu and Etherdge, 2007). Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται ως προς το ύψος του εμποδίου και την ταχύτητα ελεύθερης ροής στην είσοδο της αεροσήραγγας. Το αριθμητικό μοντέλο έχει επιβεβαιωθεί για εφαρμογές σε τετραγωνικές και τοξωτές κατασκευές. Στιγμιαίες γραμμές ροής και ταχύτητας, προκύπτουν από την απευθείας επίλυση των παραπάνω εξισώσεων και χρησιμοποιούνται για τη δυναμική και τη στατιστική ανάλυση της ροής.

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΔΙΕΠΟΥΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι αδιαστατοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes και συνέχειας που περιγράφουν τη δισδιάστατη, ισόθερμη, τυρβώδη ροή του αέρα γύρω από αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή ορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\P U}{\P t} + U\nabla U = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2 U \quad , \tag{1}$$

$$\nabla U = 0, \tag{2}$$

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

2.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην παρούσα εργασία επιβλήθηκαν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες, ώστε να προσομοιώνεται η φυσική ροή αέρα γύρω από αμφίρρικτη κατασκευή, μέσα σε αεροσήραγγα. Λεπτομέρειες των οριακών συνθηκών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

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

ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ 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

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

2.3 ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ

Ο καθορισμός της αρχικής συνθήκης είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που σχετίζονται με την επίλυση δυναμικών προβλημάτων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως αρχική συνθήκη η λύση για *Re*=1 που προέκυψε από την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε σταθερή κατάσταση (Fragos et al., 2007).

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα υπολογιστικά δεδομένα της υπό μελέτη εφαρμογής ορίστηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους:

- το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη της ροής μέσα σε αεροσήραγγες
- τα συναφή εργαστηριακά πειράματα στη μελέτη των επιδράσεων του αέρα σε κατασκευές
- τις διαστάσεις πραγματικής κλίμακας αγροτικών κατασκευών

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της υπό εξέταση υπολογιστικής εφαρμογής.

Πίνακας 2. Υπολογιστικά δεδομένα του αριθμητικού πειράματος.						
ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ 1						
ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ 2.1						
ΜΗΚΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ 28						
ΥΨΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ 4						
$\underline{\qquad API\Theta MO\Sigma REYNOLDS \qquad 700}$						

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

2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την επίλυση των εξισώσεων μαζί με τις προαναφερθείσες οριακές συνθήκες (Πίνακας 1) χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες επίλυσης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων των Psychoudaki et al. (2005) σε γλώσσα προγραμματισμού VISUAL FORTRAN 90/95. Προκειμένου όμως να προσομοιωθεί η ροή γύρω από αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, ο συγκεκριμένος κώδικας τροποποιήθηκε, ώστε να προκύψει η λύση για τη ροή γύρω από την υπό εξέταση κατασκευή με την παραπάνω γεωμετρία.

Ο υπολογιστικός κάνναβος σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακρίβεια και ο ελάχιστος υπολογιστικός χρόνος Στο Σχήμα 1, παρουσιάζεται με λεπτομέρεια ο υπολογιστικός κάνναβος της υπό εξέταση ροής.



Σχήμα 1. Ο υπολογιστικός κάνναβος του πεδίου ροής

Πίνακας 3. Στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου ροής.						
ΠΛΗΘΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	9170					
ΠΛΗΘΟΣ ΚΟΜΒΩΝ	37081					
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΑΓΝΩΣΤΩΝ	83556					

XPONIKO BHMA	0.01
--------------	------

Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων, των κόμβων, των αγνώστων και του χρονικού βήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Από την επίλυση των εξισώσεων προκύπτουν συνολικά 15000 μετρήσεις για τις άγνωστες αδιαστατοποιημένες μεταβλητές u, v, p, σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού καννάβου. Το πρόγραμμα έτρεξε σε επιτραπέζιο υπολογιστή με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, Intel® CoreTM i7 CPU 870@ 293GHz 4GB RAM.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι στιγμιαίες γραμμές ροής, για δύο χρονικές στιγμές και Re=700. Όπως φαίνεται στο σχήμα, μεταξύ των χρονικών στιγμών t=100 και t=150, προκύπτουν μεταβολές στους στροβιλισμούς που αναπτύσσονται γύρω από την αμφίρρικτη κατασκευή και ιδιαίτερα κατάντη της κατασκευής. Επομένως, προκύπτει μία συνεχής μεταβολή των στροβιλισμών, ιδιαίτερα στο πάνω άκρο της κατασκευής, σε συνάρτηση με το χρόνο, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές επιδράσεις στην εξωτερική επιφάνεια των κατασκευών, αλλά και στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα σημεία που θα αναπτυχθούν οι πιο έντονοι στροβιλισμού εξαρτώνται άμεσα από τα σημεία που θα αναπτυχθούν οι πιο έντονοι στροβιλισμοί, οι οποίοι επηρεάζουν τον τρόπο εισόδου του αέρα στην κατασκευή, εάν ανοίξουν τα παράθυρα.



Σχήμα 2. Οι στιγμιαίες γραμμές ροής επάνω και γύρω από την αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, για δύο χρονικές στιγμές, t=100 και t=150 (Re=700).

Στο Σχήμα 3 διακρίνεται η κατανομή της στιγμιαίας οριζόντιας ταχύτητας (u) του αέρα γύρω από την αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, για δύο χρονικές στιγμές και Re=700. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η οριζόντια ταχύτητα μεταβάλλεται ως προς το χώρο μεταξύ των χρονικών στιγμών t=100 και t=150. Οι αρνητικές τιμές της ταχύτητας εμφανίζονται κυρίως στην κατάντη πλευρά της κατασκευής. Οι μεγαλύτερες θετικές τιμές της οριζόντιας ταχύτητας παρατηρούνται πάνω από την κατασκευή και σε ύψος μέχρι δύο φορές το ύψος της κατασκευής. Επομένως, η ασταθής προσέγγιση της ροής δίνει περισσότερες πληροφορίες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές σχετικά με τις μεταβολές του εξωτερικού περιβάλλοντος που περιβάλλει και επηρεάζει την υπό μελέτη αγροτική κατασκευή.

Για τις ίδιες χρονικές στιγμές και *Re*=700, παρουσιάζεται η κατανομή της στιγμιαίας κατακόρυφης ταχύτητας (v) του αέρα γύρω από την αμφίρρικτη αγροτική

κατασκευή (Σχήμα 4). Όπως φαίνεται στο σχήμα, και η κατακόρυφη ταχύτητα μεταβάλλεται ως προς το χώρο μεταξύ των χρονικών στιγμών t=100 και t=150 και κυρίως κατάντη της αμφίρρικτης κατασκευής.



Σχήμα 3. Οι στιγμιαίες οριζόντιες ταχύτητες (u) του αέρα επάνω και γύρω από την αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, για δύο χρονικές στιγμές, t=100 και t=150 (*Re*=700).



Σχήμα 4. Οι στιγμιαίες κατακόρυφες ταχύτητες (v) επάνω και γύρω από την αμφίρρικτη αγροτική κατασκευή, για δύο χρονικές στιγμές, t=100 και t=150 (Re=700).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα διαγράμματα των στιγμιαίων γραμμών ροής και των συνιστωσών ταχυτήτων που προκύπτουν από την ασταθή προσέγγιση της ροής μπορεί να δώσουν λεπτομερείς πληροφορίες για τη διαμόρφωση της ροής. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η ροή του αέρα γύρω από αμφίρρικτες αγροτικές κατασκευές είναι μεταβαλλόμενη με το χρόνο και μπορεί να επηρεάσει τη θέση τοποθέτησης των ανοιγμάτων αερισμού και κατά συνέπεια το εσωτερικό περιβάλλον των κατασκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A., 2007. Direct simulation of twodimensional turbulent flow over a surface-mounted obstacle. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 55: 985-1018.
- Ould Khaoua, S.A., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T. and Chasseriaux, G., 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. Biosystems Engineering, 95 (1): 83-98.
- Νικήτα-Μαρτζοπούλου, Χ., 2006. Κτηνοτροφικές κατασκευές. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, 438 σελ.
- Psychoudaki, S.P., Fragos, V.P. and Laskos, V.N. Direct Simulation of a Two-Dimensional Flow of Relatively Low Reynolds Numbers Perturbed by a Surface-Mounted Bluff Body. IASME Transactions, 2(6): 1087-1096.
- Reichrath, S. and Davies T.W., 2002. Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlo-type glasshouse. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90:139-149.
- Shklyar, A. and Arbel, A., 2004. *Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92:1039-1059.
- Wells, D.A. and Hoxey, R.P., 1980. *Measurements of wind loads on full-scale glasshouses*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6: 139-167.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΑΥΡΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

ΠΡΟΒΑΤΙΝΩΝ

Π. Παναγάκης¹

¹Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Τομέας Αγροτικών Κατασκευών & Γεωργικής

Μηχανολογίας, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, ΓΠΑ, Ιερά Οδός

75, 11855 Αθήνα

ppap@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κάτω από ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες θέρους, οι προβατίνες της Χιώτικης και της Καραγκούνικης φυλής παρουσίασαν αναπνευστικούς ρυθμούς (breaths/min.) πάνω από το φυσιολογικό, ενώ αντίθετα οι θερμοκρασίες του σώματος (°C) δεν επηρεάστηκαν. Η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας επηρέασε άμεσα τη θερμική συμπεριφορά των προβατίνων, αφού κατά τη διάρκεια της παρουσίας ηλιακών φορτίων επέλεξαν τη σκιά του καλυμμένου χώρου στέγασης, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας επέλεξαν το εξωτερικό προαύλιο έτσι ώστε να αποβάλλουν θερμικά φορτία με ακτινοβολία. Το αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς ήταν οι ελάχιστες και μέγιστες οι τιμές του αναπνευστικού ρυθμού να συσχετίζονται ισχυρά με τις αντίστοιχες ελάχιστες και μέγιστες τιμές θερμοκρασίας μαύρης σφαίρας. Όσο η ζέστη αύξανε προς τις μεσημβρινές ώρες, τόσο η φαινομενική θερμική καταπόνηση των Χιώτικων ήταν ηπιότερη απ' ότι των Καραγκούνικων όπως φάνηκε από τις σημαντικά χαμηλότερες τιμές του αναπνευστικού ρυθμού.

Λέζεις κλειδιά: στέγαση προβατίνων; θερμική καταπόνηση; θερμοκρασία μαύρης σφαίρας; αναπνευστικός ρυθμός; θερμοκρασία σώματος

ABSTRACT

Under abnormally hot summer conditions dairy ewes of the Chios and the Karagouniko breed had respiration rates (breaths/min.) above normal, whereas their body temperature (°C) was not affected. Black-globe temperature directly affected the thermal behaviour of the two breeds, namely they seek shade during sun presence and cooled-off at the outside lot during night. As a result their minimum and maximum respiration rate values were strongly associated to the minimum and maximum black-globe temperature values. As heat ensued towards noon the apparent short-term heat stress of the Chios ewes was milder than that of the Karagouniko ewes as indicated by the significantly lower respiration rate.

Keywords: sheep housing; heat stress; black-globe temperature; respiration rate; body temperature

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Sevi κ. α. (2001; 2002) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος, αλλαγή του μεταβολισμού και ελάττωση της γαλακτοπαραγωγής μετά την έκθεση των προβατίνων, έστω και για μικρό χρονικό διάστημα, σε μέσες θερμοκρασίες 35°C ή μετά από παρατεταμένη έκθεση σε μέσες θερμοκρασίες 30°C. Η ποιότητα του γάλακτος υποβαθμίστηκε. Ο Caroprese (2008) διαπίστωσε ότι κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, στέγαστρα θα πρέπει να παρέχουν σκίαση ώστε να προστατεύουν τις προβατίνες από ανοσοκαταστολή, αδυναμία των αμυντικών μηχανισμών των μαστών και θερμική καταπόνηση. Η ASHRAE (1985) θεωρεί ότι η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη συνδυαστική δράση της θερμοκρασίας ξηρού βολβού, της κίνησης του αέρα, και της θερμικής ακτινοβολίας από τον περιβάλλοντα χώρο. Ο Hetem κ.α. (2007) μελέτησαν την αναζήτηση σκιάς από οπληφόρα θηλαστικά αξιοποιώντας δεδομένα θερμοκρασιών μαύρης σφαίρας. Αρκετά νωρίτερα, ο Johnson (1991) είχε καταστήσει σαφές ότι ο αναπνευστικός ρυθμός (breaths/min.) και η θερμοκρασία σώματος (°C) είναι δύο φυσιολογικές παράμετροι οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στην εκτίμηση της βραχυχρόνιας θερμικής καταπόνησης των προβατίνων.

Στηριζόμενοι στα αρχεία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών οι Founda και Giannakopoulos (2009) συμπέραναν ότι το υπερβολικά θερμό καλοκαίρι του 2007 είναι μία ισχυρή ένδειξη για το πώς θα είναι μελλοντικά τα καλοκαίρια στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Η Ελλάδα είναι ένας από τους κυριότερους παραγωγούς (10% του συνόλου) πρόβειου γάλακτος και κρέατος στην Ευρωπαϊκή Ένωση με ετήσια παραγωγή 670,000 tons και 80,000 tons, αντίστοιχα (Theocharopoulos κ.α., 2007).

Η οικονομική σημασία της προβατοτροφίας επέβαλε τη διεξαγωγή του πειράματος με τελικό στόχο τη διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης ανάμεσα στις θερμοκρασίες μαύρης σφαίρας και στη βραχυπρόθεσμη θερμική καταπόνηση των προβατίνων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΖΩΑ, ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Το πείραμα διεξήχθη στην προβατοτροφική μονάδα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Σε όλη τη διάρκεια του έτους προβατίνες της Χιώτικης και της Καραγκούνικης φυλής στεγάζονται σε ημι-ανοιχτά κτήρια τα οποία διαθέτουν εξωτερικά προαύλια. Η Χιώτικη φυλή κατατάσσεται στις παχύουρες ομοιόμαλλες, ενώ η Καραγκούνικη φυλή στις λεπτόουρες αναμεικτόμαλλες (Mason, 1967). Οκτώ προβατίνες από κάθε φυλή κουρεύτηκαν και τοποθετήθηκαν στο ίδιο κελί (1.30 m² ανά προβατίνα). Οι προβατίνες δε θήλαζαν. Στο ημι-ανοιχτό κτήριο χρησιμοποιείται φυσικός αερισμός, το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και υπάρχει ένας εξωτερικός διάδρομος από σκυρόδεμα που καλύπτεται από την προεξοχή της στέγης. Στο εξωτερικό προαύλιο το δάπεδο ήταν συμπιεσμένο φυσικό έδαφος και δεν υπήρχαν στέγαστρα. Οι προβατίνες σιτίζονταν τρεις φορές την ημέρα και είχαν στη διάθεση τους νερό κατά βούληση. Δώδεκα ημέρες κατά τη διάρκεια του πειράματος, στις 08:00h και στις 14:00h, όλες οι προβατίνες εγκλωβίζονταν με ήπιο τρόπο μέσα στο ημι-ανοιχτό κτήριο έτσι ώστε να καταγραφούν ο αναπνευστικός ρυθμός (breaths/min.) και η θερμοκρασία σώματος (°C). Ο αναπνευστικός ρυθμός καταγράφηκε μετρώντας τις κινήσεις του θώρακα (Hassanin κ.α.,1996; Sevi, 2001; Stockman, 2006) και η θερμοκρασία σώματος μετρήθηκε στο ορθό με χρήση ηλεκτρονικού θερμομέτρου.

2.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΡΟΒΑΤΙΝΩΝ

Οι τιμές των θερμοκρασιών μαύρης σφαίρας μετρήθηκαν με χρήση θερμοζευγών χαλκού-κωνσταντάνης που είχαν στερεωθεί στο κέντρο σφαιριδίων επιτραπέζιας αντισφαίρισης, τα οποία είχαν βαφεί με μαύρη ματ βαφή (Benton, Bauman και Fountain, 1990; Wan και Chao, 2002) και δεν ήταν προσβάσιμα στις προβατίνες. Οι τιμές καταγράφονταν κάθε ένα λεπτό και στη συνέχεια εξάγονταν ο ωριαίος μέσος όρος, ο οποίος αποθηκευόταν για παραπέρα επεξεργασία. Η αναζήτηση σκιάς καταγράφονταν κάθε δέκα λεπτά, στο ημι-ανοιχτό κτήριο και στο εξωτερικό προαύλιο, με χρήση κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης συνδεδεμένου με μαγνητοσκόπια χρονο-καθυστέρησης. Τα αντίστοιχα εκατοστιαία ποσοστά υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η μέθοδος των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (repeated measures; StatSoft, 2001) χρησιμοποιήθηκε θεωρώντας τη φυλή και την ώρα δειγματοληψίας ως ανεξάρτητες μεταβλητές και τον αναπνευστικό ρυθμό και τη θερμοκρασία του σώματος ως εξαρτημένες μεταβλητές. Οι μέσες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών δίνονται στον Πίνακα 1. Η φυλή είχε ιδιαίτερα υψηλή επίδραση στον αναπνευστικό ρυθμό (Xιώτικη: 59.0±3.5; Καραγκούνικη: 84.8±3.3), η ώρα δειγματοληψίας ήταν επίσης σημαντική (08:00h: 66.8±3.5; 14:00h: 77.0±3.3), ενώ η αλληλεπίδραση φυλής-ώρας δειγματοληψίας δεν είχε σημαντική επίδραση. Οι τιμές του μέσου αναπνευστικού ρυθμού και για τις δύο φυλές ήταν υψηλότερες από τις φυσιολογικές που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία (15- 25 breaths/min., Hemingway και Hemingway, 1966; 38 breaths/min., Hales και Webster, 1967; 17-22 breaths/min., Roger, 2008), υπονοώντας θερμική καταπόνηση.

Σε σχέση με τη θερμοκρασία σώματος, η φυλή, η ώρα δειγματοληψίας και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση δεν είχαν σημαντική επίδραση. Η θερμοκρασία του σώματος και για τις δύο φυλές (Χιώτικη: 38.5±0.05°C; Καραγκούνικη: 38.5±0.05°C) ήταν μέσα στο φυσιολογικό εύρος (37.8°C έως 40.4°C; Mohr και Krzywanek, 1990).

	Χιώτι	cη Φυλή	Καραγκο	ύνικη Φυλή		Επίπεδο σ	ημαντικότητας, p
Ώρα δειγματοληψίας (h)	08:00	14:00	08:00	14:00	s _{x̄} ^α	Breed	Sampling Time
Αναπνευστικός ρυθμός (breaths/min.)	55.1	62.8	78.5	91.1	4.7	< 0.001	<0.01
Θερμοκρασία σώματος (°C)	38.5	38.4	38.6	38.5	0.07	ns ^β	ns ^β

Πίνακας 1. Επίδραση της φυλής και της ώρας δειγματοληψίας στον αναπνευστικό ρυθμό και στη θερμοκρασία σώματος.

 ${}^{\alpha}s_{\bar{x}} = \tau \upsilon \pi$ ικό σφάλμα, ${}^{\beta}ns = \mu \eta$ σημαντικό

Τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν με εκείνα των Ames, Nellor και Adams (1971) οι οποίοι συμπέραναν ότι στις κουρεμένες προβατίνες ο αναπνευστικός ρυθμός διέφερε σημαντικά για θερμοκρασίες μεταξύ 25°C και 45°C, ενώ η θερμοκρασία του σώματος διέφερε μόνον όταν η θερμοκρασίες ήταν υψηλότερες από 45°C. Ακόμα, συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Sleiman και Abi Saab (1995), οι οποίοι συμπέραναν ότι οι προβατίνες παρουσίασαν αυξημένους αναπνευστικός ρυθμούς τις απογευματινές ώρες, ενώ η μέση θερμοκρασία του σώματος δεν ξεπέρασε την ανώτερη φυσιολογική τιμή των 40.4°C. Τέλος, επιβεβαιώνουν το Silanikove (2000), ο οποίος συμπέρανε ότι οι ομοιοστατικοί μηχανισμοί των μηρυκαστικών, συμπεριλαμβανομένου του αυξημένου αναπνευστικού ρυθμού, έχουν τη δυνατότητα να αποτρέψουν την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι προβατίνες της Χιώτικης φυλής δε θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τις συνολικές λανθάνουσες απώλειες ιδρώνουν λιγότερο αποτελεσματικά (Macfarlane, 1968; Rai, Singh και More, 1979) από τις προβατίνες της Καραγκούνικης φυλής.

Οι Panagakis και Chronopoulou (2010) παρουσίασαν διαγράμματα στα οποία φαινόταν ξεκάθαρα ότι οι προβατίνες προτιμούσαν να παραμένουν υπό σκιάν από τις 08:00h έως τις 20:00h (χρονική περίοδος Ι; υψηλά ηλιακά φορτία) και στο εξωτερικό προαύλιο κατά τη χρονική περίοδο ΙΙ (20:00h έως 24:00h; 24:00h έως 08:00h) οπότε και τα ηλιακά φορτία ήταν περιορισμένα ή ανύπαρκτα. Κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου Ι η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας ήταν υψηλότερη στο εξωτερικό προαύλιο και για το λόγο αυτό οι προβατίνες επέλεξαν να παραμείνουν κάτω από τη σκιά του ημι-ανοιχτού κτηρίου ή της προεξοχής της στέγης στον εξωτερικό διάδρομο. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου ΙΙ η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας ήταν χαμηλότερη στο εξωτερικό προαύλιο και για το λόγο αυτό οι προβατίνες επέλεξαν να παραμείνουν σε αυτό έτσι ώστε να απαλύνουν μέρος της θερμικής καταπόνησης μέσω της ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας με τον ανέφελο ψυχρό ουρανό.

Η λεπτομερέστερη επεξεργασία των δεδομένων κατέδειξε ότι οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των θερμοκρασιών μαύρης σφαίρας εμφανίζονταν στις 08:00h και στις 14:00h, αντίστοιχα (Πίνακας 2). Το εύρημα αυτό μαζί με τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 κατέστησαν απαραίτητη τη διερεύνηση, με ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis; StatSoft, 2001), της συσχέτισης ανάμεσα στις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές του αναπνευστικού ρυθμού και των θερμοκρασιών μαύρης σφαίρας, αντίστοιχα. Τα Σχήματα 1 και 2 απεικονίζουν τα αποτελέσματα αυτών των συσχετίσεων.

Ημέρα δειγματοληψίας	Ώρα		Ημι-ανοιχτό	Εξωτερικό ποοφήλιο
1	09.00	M	10.5	17.4
1	08:00	Min.	19.5	17.4
2	14:00	Max.	30.4	43.3
2	08:00	Min.	20.8	18.6
	14:00	Max.	31.7	45.2
3	08:00	Min.	21.1	19.1
	14:00	Max.	33.8	47.2
4	08:00	Min.	23.4	21.3
	14:00	Max.	37.8	49.6
5	08:00	Min.	25.8	24.0
	14:00	Max.	37.4	49.2
6	08:00	Min.	25.7	27.4
	14:00	Max.	38.9	38.0
7	08:00	Min.	28.8	27.1
	14:00	Max.	39.4	40.6
8	08:00	Min.	28.0	26.0
	14:00	Max.	43.0	45.4
9	08:00	Min.	26.4	23.8
	14:00	Max.	37.4	38.4
10	08:00	Min.	24.3	22.5
	14:00	Max.	34.8	35.1
11	08:00	Min.	25.2	22.8
	14:00	Max.	36.4	37.5
12	08:00	Min.	27.8	27.2
	14:00	Max.	34.8	35.6

Πίνακας 2.Ελάχιστες και μέγιστες τιμές μαύρης σφαίρας κατά τη διάρκεια των 12 ημερών δειγματοληψίας.



Σχήμα 1. Συσχέτιση μεταξύ αναπνευστικού ρυθμού και θερμοκρασίας μαύρης σφαίρας στις 08:00h.



Σχήμα 2. Συσχέτιση μεταξύ αναπνευστικού ρυθμού και θερμοκρασίας μαύρης σφαίρας στις 14:00h.

4. ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κάτω από ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες θέρους, οι προβατίνες της Χιώτικης και της Καραγκούνικης φυλής παρουσίασαν αναπνευστικούς ρυθμούς (breaths/min.) πάνω από το φυσιολογικό, ενώ αντίθετα οι θερμοκρασίες του σώματος (°C) δεν επηρεάστηκαν. Η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας επηρέασε άμεσα τη θερμική συμπεριφορά των προβατίνων, αφού κατά τη διάρκεια της παρουσίας ηλιακών φορτίων επέλεξαν τη σκιά του καλυμμένου χώρου στέγασης, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας επέλεξαν το εξωτερικό προαύλιο έτσι ώστε να αποβάλλουν θερμικά φορτία με ακτινοβολία. Το αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς ήταν οι ελάχιστες και μέγιστες οι τιμές του αναπνευστικού ρυθμού να συσχετίζονται ισχυρά με τις αντίστοιχες ελάχιστες και μέγιστες τιμές θερμοκρασίας μαύρης σφαίρας. Όσο η ζέστη αύξανε προς τις μεσημβρινές ώρες, τόσο η φαινομενική θερμική καταπόνηση των Χιώτικων ήταν ηπιότερη απ' ότι των Καραγκούνικων όπως φάνηκε από τις σημαντικά χαμηλότερες τιμές του αναπνευστικού ρυθμού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας ευχαριστεί την πρώην φοιτήτρια Χρονοπούλου Ευαγγελία του Τομέα Αγροτικών Κατασκευών & Γεωργικής Μηχανολογίας του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής για τη συλλογή των δεδομένων και το προσωπικό της προβατοτροφικής μονάδας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την καθημερινή φροντίδα των προβατίνων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ames, D. R., Nellor, J. E. and Adams, T., 1971. *Energy balance during heat stress in sheep*. Journal of Animal Science 32(4), 784-788.
- ASHRAE, 1985. Handbook of Fundamentals. Atlanta, Ga.: ASHRAE, (Chapter 8).
- Benton, C. C., Bauman, F. S. and Fountain, M. E., 1990. A field measurement system for the study of thermal comfort. ASHRAE Transactions 96(part 1), 623-633.
- Caroprese, M., 2008. Sheep housing and welfare. Small Ruminant Research 76(1-2), 21-25.
- Founda, D. and Giannakopoulos, C., 2009. *The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece: A typical summer in the future climate?* Global Planet Change 67(3-4), 227-236.
- Hales, J. R. S. and Webster, M. E. D., 1967. *Respiratory function during thermal tachypnoea in sheep.* Journal of Physiology 190(2), 241-260.
- Hassanin, S. H., Abdalla, E. B., Kotby, E. A., Abd-Elaziz, A. M. S. and El-Fouly, M. A., 1996. *Efficiency of asbestos shading for growth of Barki rams during hot summer*. Small Ruminant Research 20(3), 199-203.
- Hemingway, A. and Hemingway, C., 1966. Respiration of sheep at thermoneutral temperature. *Respiratory Physiology 1(1)*, 30-37.
- Hetem, R. S., Maloney, S. K., Fuller, A., Meyer, L. C. R., & Mitchell, D., 2007. Validation of a biotelemetric technique, using ambulatory miniature black globe thermometers to quantify thermoregulatory behaviour in ungulates. Journal of Experimental Zoology 307A(6), 342-356.

- Johnson, K. G., 1991. Body temperature and respiration rates of free-ranging Merino sheep in and out of shade during summer. Australian Journal of Agricultural Research 42(8), 1347-1357.
- Macfarlane, W. V., 1968. Comparative functions of ruminants in hot environments. In E. S. E. Hafez, (Editor), Adaptation of Domestic Animals, Lea & Febiger, Philadelphia, pp. 264-276
- Mason, I. L., 1967. *Sheep Breeds of the Mediterranean*. Farnham Royal, UK, Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Mohr, E. and Krzywanek, H., 1990. Variations of core-temperature rhythms in unrestrained sheep. Physiology & Behavior 48(3), 467-473.
- Panagakis, P. and Chronopoulou, E., 2010. Preliminary evaluation of the apparent short term heat-stress of dairy ewes reared under hot summer conditions. Applied Engineering in Agriculture 26(6), 1035-1042.
- Rai, A. K., Singh, M. and More, T., 1979. Cutaneous water loss and respiration rates of various breeds of sheep at high ambient temperatures. Tropical Animal Health Production 11(1), 51-56.
- Roger, P.A., 2008. *The impact of disease and disease prevention on sheep welfare*. Small Ruminant Res. 76 (1-2), 104-111.
- Sevi, A., Annicchiarico, G., Albenzio, M., Taibi, L., Muscio, A. and Dell'Aquila, S., 2001. *Effects of solar radiation and feeding time on behavior, immune response and production of lactating ewes under high ambient temperature.* Journal of Dairy Science 84(3), 629-640.
- Sevi, A., Rotunno, T., Di Caterina, R. and Muscio, A., 2002. *The fatty acid composition of ewe milk, as affected by solar radiation under high ambient temperature.* Journal of Dairy Science 69(2), 181-194.
- Silanikove, N., 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. Livestock Production Science 67(1-2), 1-18.
- Sleiman, F.T, Abi Saab, S. 1995. Influence of environment on respiration, heart rate and body temperature of filial crosses compared to local Awassi sheep. Small Ruminant Res. 16(1), 49-53.
- StatSoft, 2001. Statistica. Ver. 6. Tulsa, Okla.: StatSoft, Inc.
- Stockman, C., 2006. *The physiological and behavioural responses of sheep exposed to heat load within intensive sheep industries*. Ph.D. Dissertation, Murdoch University, 287 pp.
- Theocharopoulos, A., Melfou, K. and Papanagiotou, E., 2007. A microeconomic approach for agricoltural development: a dea application to greek sheep farms. NEW MEDIT 4, 48-53.
- Wan, M. P. and Chao, C. Y., 2002. Experimental study of thermal comfort in an office environment with an underfloor ventilation system. Indoor and Built Environment 11(5), 250-265.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΜΙΑΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ι. Παρασκευοπούλου, Γ.Κ. Ντίνας, Β.Π. Φράγκος, Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη e-mail: p.fenia@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται αριθμητικά η ροή του αέρα μέσα και έξω από μία αγροτική κατασκευή με ανοίγματα αερισμού. Οι εξισώσεις Navier-Stokes και συνέχειας που περιγράφουν το φαινόμενο επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αγροτική κατασκευή τοποθετείται, υπό κλίμακα, στο εσωτερικό αεροσήραγγας και το μήκος του μοντέλου εκτείνεται σε ολόκληρο το πλάτος της αεροσήραγγας. Η ροή είναι ασυμπίεστη, ασταθής και δισδιάστατη. Ο αριθμός Reynolds που μελετάται στην παρούσα εργασία έχει τιμή Re=2800. Τα αριθμητικά αποτελέσματα, όπως οι στιγμιαίες γραμμές ροής και ταχύτητας παρουσιάζονται για το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον της κατασκευής. Από την ανάλυση των στιγμιαίων ταχυτήτων παρατηρήθηκαν έντονες μεταβολές στη διαμόρφωση της ροής ως προς το χρόνο.

Λέζεις κλειδιά: εξισώσεις Navier-Stokes, αερισμός, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, αγροτικές κατασκευές.

NUMERICAL APPROXIMATION OF AIRFLOW INSIDE AN AGRICULTURAL STRUCTURE MODEL

I. Paraskevopoulou, G. K. Ntinas, V.P. Fragos, Ch. Nikita-Martzopoulou

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University, 54124 Thessaloniki, Greece e-mail: <u>p.fenia@hotmail.com</u>

ABSTRACT

The present work studies, numerically, the airflow inside and outside an agricultural structure with openings. The governing Navier-Stokes and continuity equations are solved with finite element method. The agricultural structure model is placed into a wind tunnel. The length of the structure model occupies the entire width of the wind tunnel. The flow is incompressible, unsteady and nominated to be two-dimensional. The Reynolds number studied in this work is Re=2800. The numerical results such as instantaneous streamlines and velocity values are presented for the interior and exterior environment of the structure. From the analysis of instantaneous velocities intense fluctuations were observed in the configuration of the flow in time.

Key words: Navier-Stokes equation, ventilation, finite element method, agricultural structure

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μία αγροτική κατασκευή ο αερισμός ή ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες του μικροκλίματός του. Επηρεάζει και ταυτόχρονα επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον, τη λειτουργία των συστημάτων ελέγχου, τις φυσιολογικές διεργασίες της καλλιέργειας ή των ζώων αλλά και από τα κατασκευαστικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Κύριος σκοπός του αερισμού είναι η μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής, η μείωση της σχετικής υγρασίας, η αύξηση της συγκέντρωσης του CO2 σε θερμοκήπια και η βελτίωση του χημικού περιβάλλοντος σε κτηνοτροφικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα ο φυσικός αερισμός είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που προκαλείται από δύο βασικούς παράγοντες: α) τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και β) τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος (Munoz et al., 1999). Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας δημιουργούν τυρβώδη ροή του αέρα και ως συνέπεια αυτού δημιουργούν διαφοροποιήσεις στη μέση πίεση, στο εσωτερικό των αγροτικών κατασκευών. Στα θερμοκήπια ο φυσικός αερισμός επιτυγχάνεται μέσω ανοιγμάτων, τα οποία συνήθως τοποθετούνται στην οροφή και στις πλευρές τους. Ο φυσικός αερισμός μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον ενός θερμοκηπίου (Finnegan, 1984) και να προσφέρει καλύτερες συνθήκες θερμοκρασίας (Zhao and Xia, 1998). Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος των ερευνητών για τη διερεύνηση των μεθόδων φυσικού αερισμού αγροτικών κατασκευών, ιδιαίτερα τα τελευταία γρόνια.

Η αναγκαιότητα διερεύνησης του φαινομένου του αερισμού σε αγροτικές κατασκευές οδήγησε τους ερευνητές να πραγματοποιήσουν πειράματα τόσο σε πραγματικές συνθήκες (Papadakis et al., 1996; Boulard et al., 1997a;2000; Wang et al., 1999) όσο και εργαστηριακά πειράματα υπό κλίμακα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν και μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής για τη διεξαγωγή υπολογιστικών πειραμάτων (Mistriotis et al., 1997; Boulard et al., 1999; Boulard et al., 2000; Molina-Aiz et al., 2004). Από τις παραπάνω μεθόδους η αεροσήραγγα αποτελεί έναν άριστο τρόπο για να ερευνηθεί αποτελεσματικότερα το φαινόμενο του αερισμού. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι παρέχει τη δυνατότητα να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνιστώσες της ταχύτητας και τα επίπεδα του τυρβώδους (turbulence levels) στο εσωτερικό και το εξωτερικό ενός μοντέλου αερισμού (Ohba et al., 2001). Η υπολογιστική μηχανική των ρευστών σε ορισμένες περιπτώσεις είναι το μοναδικό μέσο που μπορεί να δώσει πληροφορίες σε προηγμένα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά αγροτικά προβλήματα (Jiang et al., 2003).

Οι πρώτες προσπάθειες μελέτης του φυσικού αερισμού σε θερμοκήπια έγιναν από τους Sase et al. (1984) και τους Okushima et al. (1989). Οι Sase et al. (1984) μελέτησαν την ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο το οποίο ήταν τοποθετημένο μέσα σε αεροσήραγγα. Οι Okushima et al. (1989) μελέτησαν το φυσικό αερισμό σε θερμοκήπια. Συνάντησαν όμως σημαντικά προβλήματα, λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των τότε υπολογιστών, καθώς και της αδυναμίας τους να περιγράψουν με ακρίβεια το αριθμητικό πλέγμα. Οι Mistriotis et al. (1997) μελέτησαν τη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας σε φυσικά αεριζόμενα θερμοκήπια, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους συμφωνούν με ανάλογα πειράματα που διεξήχθηκαν σε αεροσήραγγα (Sase et al., 1984) και με πειράματα που έγιναν σε φυσική κλίμακα με τη χρήση τρισδιάστατων ηχητικών ανεμόμετρων (Boulard et al., 1997b). Αξιοσημείωτη προσπάθεια μαθηματικής προσομοίωσης και μελέτης του φυσικού αερισμού σε θερμοκήπια έγινε στο Ινστιτούτο Αγροτικών Ερευνών στην Γαλλία (INRA), (Boulard

et al., 1999;2000; Haxaire, 1999). Οι Yiang et al. (2003) προσομοίωσαν τη ροή του αέρα χρησιμοποιώντας τρεις περιπτώσεις ανοιγμάτων. Οι Mollina-Aiz et al. (2004) μέτρησαν και προσομοίωσαν τις παραμέτρους του μικροκλίματος σε θερμοκήπια τύπου Αλμερίας και συγκεκριμένα την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στο φυσικό αερισμό. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστομηχανικής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση του ανέμου και της θερμοκρασίας στο φυσικό αερισμό του εσωτερικού των αγροτικών κατασκευών. 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.

Η παρούσα εργασία μελετάει αριθμητικά τη ροή του αέρα στο εσωτερικό μίας κατασκευής με συμμετρική γεωμετρία. Η υπόθεση ότι ο υπό μελέτη χώρος είναι ορθογωνικός βασίστηκε σε αντίστοιχα εργαστηριακά πειράματα (Ohba et al., 2001) προκειμένου να γίνει επαλήθευση του χρησιμοποιούμενου υπολογιστικού κώδικα (test room)(Zhang et al., 2000). Η χρήση του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου θα συμβάλλει στη μελέτη των αγροτικών κατασκευών με πραγματικές γεωμετρίες. Το φαινόμενο περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes και συνέχειας, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ροή που προσομοιώνεται είναι ασυμπίεστη, ασταθής και δισδιάστατη, ενώ ο αριθμός Reynolds που μελετάται έχει τιμή Re=2800. Η αγροτική κατασκευή τοποθετείται, υπό κλίμακα, στο εσωτερικό αεροσήραγγας και το μήκος του μοντέλου εκτείνεται σε ολόκληρο το πλάτος της αεροσήραγγας.

2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΔΙΕΠΟΥΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

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

α) Εξίσωση κίνησης (εξισώσεις N-S)

$$\frac{\P U}{\P t} + U\nabla U = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2 U \quad , \tag{1}$$

β) εξίσωση συνέχειας

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. ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ

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. Λεπτομέρειες των οριακών συνθηκών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

2.3. ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ

Ο καθορισμός της αρχικής συνθήκης είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που απασχολεί την 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. Οι οριακές συνθήκες του υπολογιστικού πεδίου ροής.							
ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΕΙΣΟΔΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	ΕΞΟΔΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ				
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ, (u)	0 (Συνθήκες μη ολίσθησης)	1 (Ομοιόμορφη ροη)	Ελεύθερη οριακή συνθήκη				
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ, (v)	0 (Συνθήκες μη ολίσθησης)	1 (Ομοιόμορφη ροη)	Ελεύθερη οριακή συνθήκη				

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

2.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα υπολογιστικά δεδομένα της μελετώμενης εφαρμογής ορίστηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους:

- το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη ροών μέσα σε αεροσήραγγες
- τα συναφή εργαστηριακά πειράματα για τη μελέτη των επιδράσεων αέρα σε κατασκευές

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της εξεταζόμενης υπολογιστικής εφαρμογής.

Πίνακας 2. Υπολογιστικά δεδομένα του αριθμητικού πειράματος.						
 ΥΨΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	1					
ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	2					
ΜΗΚΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	30					
ΥΨΟΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ	10					
ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS	2800					
 10 1 1						

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

2.5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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 Psychoudaki et al. (2005) 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 ορθογωνικής κατασκευής με ανοίγματα.

Το υπολογιστικό πλέγμα σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακρίβεια και ο ελάχιστος υπολογιστικός χρόνος. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα σε ολόκληρο το πεδίο ροής, ενώ στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω και μέσα στην κατασκευή.



Σχήμα 1. Το υπολογιστικό πλέγμα του υπό μελέτη πεδίου ροής στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής.



Σχήμα 2. Λεπτομέρειες του υπολογιστικό πλέγματος γύρω και μέσα στην κατασκευή.

Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων, των κόμβων, των αγνώστων και του χρονικού βήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Από την επίλυση των εξισώσεων προκύπτουν συνολικά 6000 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 του υπολογιστικού πεδίου ροής.					
ΠΛΗΘΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19735				
ΠΛΗΘΟΣ ΚΟΜΒΩΝ	79940				
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΑΓΝΩΣΤΩΝ	180115				
XPONIKO BHMA	0.01				

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι στιγμιαίες γραμμές ροής, για δύο χρονικές στιγμές και για *Re*=2800. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, για τις χρονικές στιγμές t=30 και t=60, παρατηρείται συνεχής μεταβολή των στροβιλισμών στο εσωτερικό περιβάλλον

της κατασκευής, με το χρόνο. Η ροή εισέρχεται από το ανάντη άνοιγμα και ως την έξοδο της από το κατάντη άνοιγμα, διακρίνεται συνεχής παραγωγή και μεταβολή των στροβιλισμών. Στο ανάντη εξωτερικό περιβάλλον έχουμε τη δημιουργία ενός σχεδόν μόνιμου στροβιλισμού. Στην κατάντη περιοχή, λόγω της αποκόλλησης της ροής από την ανάντη γωνία της κατασκευής αλλά και της επίδρασης του κατάντη ανοίγματος, παρατηρούνται έντονες μεταβολές στη διαμόρφωση της ροής. Οι στροβιλισμοί μπορεί να επηρεάσουν τα τοιχώματα καθώς και το μικροκλίμα της κατασκευής. Επίσης, μπορούν να επηρεάσουν το χημικό περιβάλλον, προκαλώντας τη δημιουργία θυλάκων αέρα με απώτερο αποτέλεσμα τη συγκέντρωση τοξικών ουσιών και τον ανεπαρκή αερισμό του χώρου.



Σχήμα 3. Οι στιγμιαίες γραμμές ροής στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής, για δύο χρονικές στιγμές, t=30 και t=60 (*Re*=2800).



Σχήμα 4. Οι στιγμιαίες οριζόντιες ταχύτητες (u) του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής, για δύο χρονικές στιγμές, t=30 και t=60 (*Re*=2800).

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή των οριζόντιων ταχυτήτων του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής, για δύο χρονικές στιγμές και για Re = 2800. Παρατηρώντας τα δύο σχήματα βλέπουμε ότι η οριζόντια ταχύτητα μεταβάλλεται ως προς το χώρο ανάμεσα στις δύο χρονικές στιγμές t= 30 και t=60. Οι υψηλότερες τιμές της στιγμιαίας οριζόντιας ταχύτητας εμφανίζονται πάνω από την αγροτική κατασκευή και σε ύψος περίπου μέχρι δύο φορές το ύψος της κατασκευής. Στα ανοίγματα οι τιμές της ταχύτητας είναι θετικές και έχουν τιμές από 0.4 έως περίπου 1. Στο εσωτερικό της κατασκευής η στιγμιαία οριζόντια ταχύτητα μεταβάλλεται

συνεχώς μεταξύ αρνητικών και θετικών τιμών. Στην εσωτερική ανάντη γωνία η ταχύτητα έχει σχεδόν μόνιμα αρνητικές τιμές. Οι υψηλότερες θετικές τιμές της οριζόντιας ταχύτητας στο εσωτερικό της κατασκευής παρατηρούνται κυρίως στο μέσο της.

Οι στιγμιαίες κατακόρυφες ταχύτητες του αέρα (v) για τις χρονικές στιγμές t= 30 και t=60 και για ίδια τιμή του αριθμού Reynolds παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Παρατηρούμε ότι στο ανάντη άνοιγμα οι ταχύτητες έχουν αρνητικές τιμές, ενώ στο κατάντη άνοιγμα έχουν θετικές. Στο εσωτερικό της κατασκευής παρατηρείται συνεχής μεταβολή της ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 5. Οι στιγμιαίες κατακόρυφες ταχύτητες (v) του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό της αγροτικής κατασκευής, για δύο χρονικές στιγμές, t=30 και t=60 (*Re*=2800).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απευθείας επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και συνέχειας παρέχει τη δυνατότητα της προσέγγισης της ροής μέσα και γύρω από μία αγροτική κατασκευή όπως ακριβώς γίνεται σε ένα αντίστοιχο εργαστηριακό πείραμα. Μελετώντας τα διαγράμματα των στιγμιαίων γραμμών ροής και των συνιστωσών των ταχυτήτων παρατηρούνται έντονες μεταβολές στο εσωτερικό περιβάλλον της κατασκευής, ενώ στο εξωτερικό περιβάλλον οι μεταβολές είναι πιο ήπιες. Οι παραπάνω μεταβολές μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τις συνιστώσες του μικροκλίματος, όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα καθώς και η συγκέντρωση CO₂. Ακόμη, μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση του αέρα, η οποία έχει άμεση επίδραση στο εσωτερικό περιβάλλον ιδιαίτερα όταν υπάρχουν συστήματα ελέγχου όπως συστήματα ρύθμισης θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα προβλήματα γίνονται εντονότερα όταν μέσα στην κατασκευή υπάρχουν φυτά ή ζώα, τα οποία για την ομαλή ανάπτυξη τους απαιτούν σταθερές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bartzanas, T., Boulard, T. and Kittas, C., 2004. *Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse*. Biosystems Engineering, 88: 479–490.
- Boulard, T., Feuilloley, P. and Kittas, C., 1997a. *Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types*. Journal of Agricultural Engineering Research, 67: 249-266.
- Boulard, T., Papadakis, G., Kittas, C. and Mermier, M., 1997b. *Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse*. Agricultural and Forest Meteorology, 88: 111-119.

- Boulard, T., Haxaire, R., Lamrari, M.A., Roy, J.C. and Jaffrin, A., 1999. *Characterization and modeling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse*. Journal of Agricultural Engineering Research, 74: 135-144.
- Boulard, T., Wang, S. and Haxaire, R., 2000. Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel. Agricultural and Forest Meteorology, 100: 169–181.
- Finnegan, J.J., Pickering, C.A.C. and Burge, P.S., 1984. *The sick building syndrome: prevalence studies*. British Medical Journal, 289: 1573-1575.
- Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A., 2007. Direct simulation of twodimensional turbulent flow over a surface-mounted obstacle. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 55: 985-1018.
- Jiang, Y., Alexander, D., J., Huw, A. and Qingyan, R.C., 2003. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91: 331-353.
- Mistriotis, A., De Jong, T., Wagemans, M.J.M. and Bot, G.P.A., 1997. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings. Netherlands Journal of Agricultural Science, 45: 81-96.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L. and Álvarez, A.J., 2004. *Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics*. Agricultural and Forest Meteorology, 125: 33-51.
- Munoz, P., Montero, J.I., Anton, A. and Giuffrida F., 1999. *Effect of insect-proof* screens and roof openings in greenhouse ventilation. Journal of Agricultural Engineering Research, 73: 171-178.
- Ohba, M., Irie, K., Kurabuchi, T., 2001. *Study on airflow characteristics inside and* outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89: 1513–1524.
- Okushima, L., Sase, S. and Nara, M., 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. Acta Horticulturae, 248: 129-136.
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J.F. and Boulard, T., 1996. Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings. Journal of Agricultural Engineering Research, 63: 219-228.
- Psychoudaki, S.P., Fragos, V.P. and Laskos, V.N., 2005. Direct Simulation of a Two-Dimentional Flow of Relatively Low Reynolds Numbers Perturbed by a Surface-Mounted Bluff Body. IASME Transactions, 2(6): 1087-1096.
- Sase, S., Takakura, T. and Nara, M., 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. Acta Horticulturae, 148: 329-337.
- Wang, S., Boulard, T., and Haxaire, R., 1999. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. Agricultural and Forest Meteorology, 96: 181-188.
- Zhang, G., Morsing, S., Bjerg, B., Svidt, K. and Strøm, J.S., 2000. *Test Room for Validation of Airflow Patterns estimated by Computational Fluid Dynamics*. Journal of Agricultural Engineering Research, 76: 141-148
- Zhao, R. and Xia, Y., 1998. *Effective non-isothermal and intermittent air movement on human thermal responses*. Proceedings of Room vent 98, Stockholm, 2: 351-367.

ΜΕΛΕΤΉ ΤΗΣ ΣΧΕΣΉΣ ΥΔΑΤΙΚΉΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΉΣ ΗΛΙΑΚΉΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Ι. Λ. Τσιρογιάννης¹, Δ. Σάββας², Ν. Κατσούλας³ και Κ. Κίττας³

¹ ΤΕΙ Ηπείρου, Τμ. Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου. Τ.Θ. 110, 47100 Άρτα. <u>itsirog@teiep.gr</u>
²Γεωπονικό Παν. Αθήνας, Τμ. Φυτ. Παρ/γής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα. <u>dsavvas@aua.gr</u>
²Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας, Φυτ. Παρ/γής και Αγρ. Περιβάλλοντος, Εργ. Γεωργ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος. 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, <u>ckittas@agr.uth.gr</u>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας γίνεται αξιολόγηση της σχέσης διαφόρων δεικτών ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια με τη διαθεσιμότητα νερού στο υπόστρωμα και την υδατική κατάσταση της καλλιέργειας. Οι πειραματικές μετρήσεις αφορούν θερμοκηπιακές καλλιέργειες ζέρμπερας και ρόκας. Τα πρώτα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά αλλά χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση ώστε να βρεθούν πρακτικά εφαρμόσιμες μεθοδολογίες που θα μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου της άρδευσης.

Λέζεις κλειδιά: δείκτες ανάκλασης, διαχείριση άρδευσης, διαπνοή, στοματική αγωγιμότητα, ραδιόμετρο, κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία

EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER STATUS AND SOLAR RADIATION REFLECTANCE OVER GREENHOUSE CULTIVATIONS

I. L. Tsirogiannis¹, D. Savvas², N. Katsoulas³ and C. Kittas³

¹ TEI of Epirus, Dept. FLA. P.O. Box 110, 47100 Arta. <u>itsirog@teiep.gr</u>
²Agricultural Univ. of Athens, Dept. of Crop Prod., Iera Odos 75,11855 Athens, <u>dsavvas@aua.gr</u>
³ University of Thessaly, School of Agr. Sciences, Dept. of Agriculture Crop Production and Rural Environment, N. 38446, Ionia, Magnesia <u>ckittas@agr.uth.gr</u>

ABSTRACT

In the framework of the present work a number of solar radiation reflection indices are evaluated regarding their correlation with substrate and crop water status. The experiments concern greenhouse cultivations of gerbera and rocket. The results indicate that there is a correlation between water availability and canopy reflectance but further investigation is needed in order to develop relevant practical systems for greenhouse irrigation control.

Keywords: reflection indices, irrigation control, crop transpiration, stomatal conductance, radiometer, near infrared radiation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση της άρδευσης στα σύγχρονα θερμοκήπια γίνεται μέσω αυτόματων συστημάτων που αξιοποιούν μετρήσεις από κατάλληλους αισθητήρες. Η πλειοψηφία των συστημάτων αυτών αξιοποιεί έμμεσες μετρήσεις για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών, καθώς παρά το ότι υπάρχει μία γενικευμένη αποδοχή σχετικά με τα πλεονεκτήματα των άμεσων φυσιολογικών δεικτών όσο αφορά τον χαρακτηρισμό

της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών και τον εντοπισμό σχετικών καταπονήσεων – συμπεριλαμβανομένης και της υδατικής -, η εφαρμογή τους σε πρακτικό επίπεδο παραμένει υπό διερεύνηση (Jones, 2004, Sarlikioti, 2010).

Όταν η διαθεσιμότητα νερού στα φυτά δεν καλύπτει τις ανάγκες διαπνοής τους, εμφανίζεται υδατική καταπόνηση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα το άνοιγμα των στοματίων και εν συνεχεία η θερμοκρασία των φύλλων (Katsoulas κ.α., 2006) και ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (Sarlikioti κ.α., 2010). Εξαιτίας αυτών, επηρεάζονται μία σειρά από παράγοντες όπως η ανάκλαση του ηλιακού φωτός (Knipling, 1970), ο φθορισμός χλωροφύλλης (Norikane και Kurata, 2001) και η μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας (Jones και Schofield, 2008). Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει ώστε να αναπτυχθεί μία πρότυπη σχέση πρόβλεψης της υδατικής καταπόνησης συναρτήσει της ανάκλασης της ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου (NIR) και ένας μεγάλος αριθμός από αυτές αφορούσαν καλλιέργειες εντός θερμοκηπίου (Penũelas κ.a., 1993, Kacira κ.α., 2005, Granta κ.α., 2006, Graeff και Claupein, 2007, Zalaluk και Sri Ranjan, 2008, Sarlikioti κ.α., 2010). Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με το χρόνο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η χρήση ενός μόνο μήκους κύματος μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο για τον εντοπισμό φασματικών περιοχών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση και όγι για να γαρακτηρίσει με επαναληψιμότητα μία φυτική επιφάνεια (Hatfield κ.α., 1985). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το συνδυασμό δεδομένων από περισσότερες περιοχές του φάσματος, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό φυτικούς δείκτες (Thenkabail κ.α., 2000). Οι πιο κοινές μορφές τέτοιων δεικτών είναι οι απλοί φυτικοί δείκτες που προκύπτουν από τη διαίρεση της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος και οι φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών που υπολογίζονται διαιρώντας τη διαφορά της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος με το άθροισμα της ανάκλασης στις ίδιες περιοχές (Zakaluk και Sri Ranjan, 2008). Or Penũelas κ.α. (1993) βρήκαν ότι ο Water Band Index (= λ όγος έντασης ακτινοβολίας σε μήκος κύματος 970 nm προς έντασης ακτινοβολίας σε μήκος κύματος 902 nm, R970/R902) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της υδατικής κατάστασης των φυτών. Σύμφωνα με τον Nantt (2008) η υδατική καταπόνηση είναι γενικά συνδεμένη με αύξηση της ανάκλασης στην περιογή των 560-710nm και μείωση της ανάκλασης σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 760nm. Οι Penũelas κ.α. (1994) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο Normalised Difference Vegetation Index (NDVI = (R850 - R680) / (R850 + R680)) μειώνεται καθώς αυξάνεται η υδατική καταπόνηση. Ο Physiological Reflectance Index (PRI = (R550-R530) / (R550+R530)) έγει αποδειγθεί ευαίσθητος στην υδατική καταπόνηση (Penũelas κ.a., 1994, Suárez κ.α., 2009. Sarlikioti ĸ.a., 2010).

Κύριος στόχος της παρούσας πειραματικής διερεύνησης είναι μελέτη της επίδρασης της υδατικής καταπόνησης στην ανάκλαση της ακτινοβολίας από την κόμη μιας ανθοκομικής και μιας λαχανοκομικής καλλιέργειας εντός του θερμοκηπίου.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ, ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το καλοκαίρι του 2008 και του 2009 (ζέρμπερα, Gerbera jamesonii cv. Balance[®], De Kwakel B.V.) και του 2010 (ρόκα, Eruca sativa Mill. Rocket Commun 2[®], FytroSeeds S.A.) στο γυάλινο θερμοκήπιο του Τμήματος Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου στους Κωστακιούς Άρτας (συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87, X: 234.712,17 m, Y: 4.333.915,20 m, υψόμετρο 5 m). Το θερμοκήπιο είναι διπλό αμφικλινές, με προσανατολισμό Α-Δ. Ο αερισμός γίνονταν από συνεχή ανοίγματα οροφής και πλευρών που άνοιγαν όταν η θερμοκρασία ήταν

μεγαλύτερη από 22°C, ενώ υπήρχε εγκατεστημένη κουρτίνα σκίασης. Η άρδευση γίνονταν με σύστημα στάγδην και τα προγράμματα καταρτίζονταν με βάση τη μεθοδολογία που αναφέρουν οι Katsoulas κ.α. (2006). Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν στο μεσαίο τμήμα του θερμοκηπίου. Η καλλιέργεια ζέρμπερας (2,60 φυτά m⁻²) έγινε σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα σε γλάστρες των 4 L με υπόστρωμα ελαφρόπετρας σε πάγκους ύψους 0,85m, ενώ η καλλιέργεια ρόκας (39,4 φυτά m⁻²) με απλή άρδευση, σε γλάστρες των 4 L με αμμοπηλώδες έδαφος στο επίπεδο του δαπέδου.

Μία σειρά από παραμέτρους του εναέριου περιβάλλοντος και της καλλιέργειας μετρήθηκαν: η θερμοκρασία (°C) και η σχετική υγρασία (%) αέρα με αισθητήρες T.RH (HD9008TR, DeltaOhm, Italy) καθώς και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (W m⁻²) με δύο πυρανόμετρων (SKS 1110, Skye instruments, Powys, U.K.) εντός και εκτός του θερμοκηπίου, η καθαρή ακτινοβολία κόμης (W m⁻²) με πυραδιόμετρο (LP-NET 07, DeltaOhm, Italy) εγκατεστημένου σε ύψος 0,75 m πάνω από την κόμη, η θερμοκρασία φύλλων (°C) με θερμοζεύγη (Copper (PFA 0,01mm)-Constantan (PFA Teflon 0,01mm), OMEGA Engineering, USA), τα οποία ήταν κολλημένα στην κάτω πλευρά των φύλλων (η θερμοκρασία κόμης υπολογιζόταν ως ο μέσος όρος των τιμών από 3 τουλάχιστον τυχαία επιλεγμένα ώριμα και υγιή φύλλα). Ο ρυθμός διαπνοής (kg m⁻² s⁻¹) των φυτών της μεταγείρισης αναφοράς (100%ET_c) προσδιορίστηκε με διάταξη λυσιμέτρου (60000G.SCS, Presica, Dietikon, Switzerland), η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (θ σε %v/v) με διηλεκτρικούς αισθητήρες πεδίου συχνότητας, FDR (10HS, Decagon Devices Inc. WA,USA) τοποθετημένους κατακόρυφα ώστε να μετρούν το μέσο όρο υγρασίας για 10cm βάθους. Όλες οι παραπάνω μετρήσεις συλλέγονταν σε κατάλληλα συστήματα καταγραφής. Οι μετρήσεις γίνονταν ανά 30s και αποθηκεύονταν ο μέσος όρος 10λέπτου. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (m² m⁻²) της καλλιέργειας εκτιμούνταν με σαρωτή (ScanJet 4850, HP, USA) μέσω καταστροφικών Τέλος για συγκεκριμένες ημέρες από 10:00 έως 18:00 κάθε ημέρα, μετρήσεων. γίνονταν ανά 15min μετρήσεις της ανάκλασης από την κόμη της καλλιέργειας με χρήση φορητού πολυφασματικού ραδιόμετρου (MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA). Οι μετρήσεις αφορούσαν 8 στενές φασματικές περιοχές γύρω από τα μήκη κύματος 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm. Το ραδιόμετρο ήταν εγκατεστημένο σε ύψος 1,5 και 1m πάνω από την κόμη για την ζέρμπερα και τη ρόκα αντίστοιχα (οι αντίστοιχες επιφάνειες δείγματος, σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή του MSR87, ήταν $0,44 \text{ m}^2$ και $0,20 \text{ m}^2$). Οι μετρήσεις γίνονταν πάνω από συμπαγή φυλλική επιφάνεια και κατά την περίοδο αυτή η κουρτίνα ήταν μαζεμένη. Ακόμη τις ίδιες ημέρες γίνονταν ανά διαστήματα μετρήσεις στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων (mm s⁻¹) με γρήση πορομέτρου (AP4, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK).

Με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων για την αξιολόγηση της σύνδεσης φασματικών φυτικών δεικτών και υδατικής κατάστασης εφαρμόστηκαν μία σειρά από μεταχειρίσεις. Στο πείραμα της ζέρμπερας υπήρχε μία μακρά περίοδος (2008) όπου εφαρμόζονταν δύο διαφορετικές συχνότητες άρδευσης, άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου γίνονταν ίσο με 1650 kJm⁻² (δόση 0,125mm) ή 3300 kJm⁻² (δόση 0,250mm), με ίδια συνολική ποσότητα νερού σε διάστημα ημέρας (η υδατοικανότητα φυτοδοχείου υπολογίστηκε στο 36,90% κατ'όγκο). Το καλοκαίρι του 2009, εφαρμόστηκαν στην καλλιέργεια της ζέρμπερας (για ορισμένη περίοδο) τρεις μεταχειρίσεις άρδευσης (επαρκώς αρδευόμενη: 100%ET_c (όπως υπολογίζονταν από τα δεδομένα του λυσίμετρου), μερικώς αρδευόμενη: (50% ή 33%ET_c) και υδατικά καταπονούμενη: 0%ET_c) προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση πιθανής υδατικής καταπόνησης στην ανάκλαση της ακτινοβολίας από την καλλιέργεια. Στο πείραμα της ρόκας (καλοκαίρι 2010) εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης 33%, 66% και 100% της ET_c (όπως

υπολογίζονταν από τα δεδομένα του λυσίμετρου), επί 15 ημέρες κατά τη διάρκεια της μέσης περιόδου (mid-season) της καλλιέργειας. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις από κάθε μεταχείριση για την σύγκριση μέσων τιμών που έγινε μέσω ελέγχων t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95% με χρήση του PlotIT (Scientific Programming Enterprises, USA).

2.2. ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΥ ΑΞΙΟΛΟΓΗΘΗΚΑΝ

Οι μέθοδοι τηλεπισκόπισης που εφαρμόζονται με επιτυχία εδώ και χρόνια σε αγρούς, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως έχουν εντός του θερμοκηπίου κυρίως λόγω της πολύπλοκης κατάστασης που δημιουργείται από τις σκιάσεις, από τα στοιγεία σκελετού και εξοπλισμού (Jones, 2004, Sarlikioti κ.α., 2010). Η λήψη μετρήσεων με πολυφασματικό ραδιόμετρο εντός θερμοκηπίου αποτέλεσε από την πρώτη στιγμή μία πρόκληση καθώς η βασική υπόθεση στην οποία βασίζεται η λειτουργία του οργάνου «η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας που φτάνει στους αισθητήρες που μετρούν προσπίπτουσα ακτινοβολία (επάνω πλευρά του οργάνου) είναι ίδια με αυτή που προσπίπτει στην επιφάνεια στόχο για την οποία μετράμε την ανάκλαση» τίθεται υπό αμφισβήτηση μια και το πλήθος εμποδίων που υπάρχουν στο θερμοκήπιο (σκελετός, εξοπλισμός κοκ) δημιουργούν πολύ έντονες τοπικές διαφορές στο φωτισμό. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έγινε επικοινωνία με την κατασκευάστρια εταιρεία (Nantt, 2008) και μετά από μία σειρά συστάσεων και δοκιμών αναπτύχθηκε μία ειδική τεχνική με χρήση επιφάνειας αναφοράς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μόνο οι κάτω αισθητήρες του οργάνου (αυτοί που μετρούν ανάκλαση), κάτι που ρυθμίζεται μέσω κατάλληλων επιλογών στο λογισμικό διαχείρισης του οργάνου. Ένα λευκό ματ πάνελ, μεγέθους 1 m² τοποθετούνταν στο επίπεδο της φυλλικής επιφάνειας. Πριν από κάθε μέτρηση ανάκλασης από τη φυλλική επιφάνεια γίνεται μία μέτρηση ανάκλασης από την λευκή επιφάνεια με σκοπό να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας αναφοράς κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Ακόμη, στην αρχή κάθε σετ μετρήσεων λαμβάνεται μία μέτρηση ανάκλασης από πολύ σκοτεινή επιφάνεια ως ρυθμιστικό δεδομένο από το λογισμικό επεξεργασίας μετρήσεων που συνοδεύει το όργανο. Ένα άλλο ζήτημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι ότι ενώ η χρήση του λευκού πάνελ μπορούσε να απομακρύνει θορύβους από διαφορές στο φωτισμό και σκιές, δεν μπορούσε να κάνει το ίδιο και για διαφορές στην ανάκλαση που προέρχονταν από ακάλυπτο υπόστρωμα, την υγρασία που έμενε σε επιφάνειες μετά από άρδευση, τους πάγκους φύτευσης, τα άνθη κοκ. Για το σκοπό αυτό όλα τα άνθη αφαιρούνταν και όλες οι πιθανώς εκτεθειμένες επιφάνειες καλύπτονταν από μαύρο ματ ύφασμα κατά την περίοδο των μετρήσεων.

Στο πλαίσιο της έρευνας που παρουσιάζεται, μελετήθηκαν οι ακόλουθοι φυτικοί δείκτες:

- SB ανάκλαση σε κάθε ένα από τα διαφορετικά μήκη κύματος του πολυφασματικού ραδιόμετρου,
- SR φυτικοί δείκτες απλών λόγων (όλοι οι διαθέσιμοι συνδυασμοί από τα διαθέσιμα μήκη κύματος),
- μία σειρά από φυτικούς δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών, με έμφαση (βάση των σχετικών βιβλιογραφικών αναφορών καθώς και των πρώτων αποτελεσμάτων από την αξιολόγηση των SB και SR) στους ακόλουθους:
 - sPRI = (R560 R510)/(R560 + R510) (δείκτης παρόμοιος με τον PRI-Physiological Reflectance Index, ο PRI χρησιμοποιεί την ανάκλαση στα 530 και 550 nm, αλλά αυτά τα μήκη κύματος δεν ήταν διαθέσιμα στο όργανο που χρησιμοποιήθηκε και έτσι επιλέχθηκαν τα κοντινότερα διαθέσιμα μήκη κύματος,

ο sNDVI1 = (R810 - R710)/(R810 + R710), sNDVI2 = (R810 - R560)/(R810 + R560) καt sNDVI3 = (R810 - R660)/(R810 + R660).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το τυπικό φάσμα ανάκλασης από μία καλλιέργεια (Knipling, 1970), παρουσιάζει σχετικά χαμηλές τιμές από τα 450 έως τα 650nm -με μία αύξηση στην περιοχή του πράσινου- και υψηλότερες τιμές από τα 650nm έως την αρχή του κοντινού υπέρυθρου. ΣτηνΕικόνα 1 παρουσιάζονται τα φάσματα ανάκλασης φυτών ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 50%ET_c και 0%ET_c) το μεσημέρι μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας. Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι υπάρχει συνδιακύμανση των τιμών ανάκλασης μεταξύ των μεταχειρίσεων με τις τιμές της υπό καταπόνηση μεταχείρισης (0%ETc) να διαφέρουν σημαντικά από αυτές των αρδευόμενων (50%ETc και 100%ETc). Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από την καλλιέργεια ρόκας (οι μετρήσεις δεν παρουσιάζονται).



Εικόνα 1 Φάσματα ανάκλασης καλλιέργειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις το μεσημέρι μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (οι καμπύλες για τα 760 και τα 810 nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα)

Στο πλαίσιο της πρώτης περιόδου του πειράματος με ζέρμπερα έγινε μία αρχική προσπάθεια αξιολόγησης επιλεγμένων φασματικών δεικτών ανάκλασης και τελικά η καλύτερη απόκριση παρατηρήθηκε για το δείκτη sPRI, ο οποίος παρουσίαζε πολύ καλή συσχέτιση με την στοματική αγωγιμότητα της φυλλικής επιφάνειας.

Κατά την δεύτερη περίοδο μετρήσεων στην ζέρμπερα, δόθηκε έμφαση στην αξιολόγηση σύνθετων φασματικών δεικτών και βρέθηκε ότι ο sPRI και οι sNDVI1 και 3 είχαν μικρότερες τιμές για μετρήσεις πάνω από επιφάνειες υπό υδατική καταπόνηση. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν και οι Penũelas κ.α. (1994). Για τους δείκτες αυτούς, οι τιμές μεταξύ της μεταχείρισης 0%ET_c και των αρδευόμενων μεταχειρίσεων (50%ET_c και 100%ET_c) διέφεραν σημαντικά ενώ οι τιμές των δεικτών τις μεταχειρίσεων (50%ET_c και 100%ET_c) διέφεραν σημαντικά ενώ οι τιμές των δεικτών τις μεταχειρίσεως 50%ET_c και 100%ET_c δεν παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές. Με βάση τα ίδια πειραματικά δεδομένα βρέθηκε ακόμη πως υπήρχε καλή γραμμική συσχέτιση (R² μεταξύ 0,7 και 0,8) για τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις (50%ET_c και 100%ET_c) μεταξύ του θ και της ανάκλασης στα 510, 560 και 610 nm, των απλών λόγων R560/R660 και R560/R610, του sPRI και του sNDVI3. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης CWSI (υπολογίστηκε σύμφωνα με τα προτεινόμενα από τους Jackson κ.α. (1981), 0: όχι υδατική καταπόνηση; 1: μέγιστη υδατική καταπόνηση) παρουσίασε καλή γραμμική συσχέτιση (R² μεταξύ 0,7 και 0,8) με την ανάκλαση στα 510 nm, το λόγο R710/R460

και το δείκτη ((R710- R460)/(R710+ R460)) τόσο στις αρδευόμενες όσο και στη μεταχείριση υπό υδατική καταπόνηση (0%ET_c).



Εικόνα 2 Υγρασία εδάφους (θ %v/v) και δείκτες ανάκλασης πάνω από καλλιέργεια ρόκας (για τρεις συνεχόμενες ηλιόλουστες ημέρες στο μέσο του καλοκαιριού) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (66%ET_c και 33%ET_c)

Στο πείραμα με ρόκα βρέθηκε ότι οι σύνθετοι υπό αξιολόγηση δείκτες sPRI, SNDVI 1 και 2 παρουσιάζουν μείωση γύρω από το μεσημέρι, όταν η ζήτηση για νερό γίνεται περισσότερο έντονη (Εικόνα 2), αλλά στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρχαν μόνο μεταξύ των μεταχειρίσεων 100% ET_c και 33% ET_c και 66% ET_c και 33% ET_c ((τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Παρατηρήθηκε μία τάση μείωσης των τιμών για όλους τους σύνθετους δείκτες που αξιολογήθηκαν η οποία σχετίζονταν με το χρόνο έναρξης των μεταχειρίσεων ελλειμματικής άρδευσης (για τις μεταχειρίσεις 66% ETc και 33%ET_c) όσο οι ημέρες περνούν και η θ πέφτει σταδιακά σε χαμηλότερα επίπεδα (Εικόνα 2). Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της θ και της ανάκλασης στα 710 nm έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα (R^2 =0,73, 0,76 και 0,74 για τις μεταχειρίσεις 100% ET_c, 66% ET_c και 33% ET_c αντίστοιχα) όπως και μεταξύ θ και SNDVI2 για την μεταχείριση 33% ET_c (R^2 =0,68). Ακόμη, η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε μία ικανοποιητική γραμμική συσγέτιση ($\mathbf{R}^2 = 0.74$) μεταξύ sPRI και CWSI (Εικόνα 3). Φαίνεται ότι όσο η υδατική καταπόνηση αυξάνεται, ο sPRI ελαττώνεται. Αυτό το εύρημα βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα των Sarlikioti κ.a. (2010), οι οποίοι έδειξαν ότι ο PRI, είναι αντιστρόφως ανάλογος της στοματικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 3 Σχέση μεταξύ sPRI και CWSI για τη μεταχείριση 100%ΕΤ_c σε καλλιέργεια ρόκας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ διαθεσιμότητας νερού και υδατικής κατάστασης και φασματικών δεικτών ανάκλασης στην περιοχή του ορατού και για τις δύο καλλιέργειες που μελετήθηκαν. Η ύπαρξη σημαντικών διαφορών μόνο μεταξύ αρδευόμενων και ισχυρά καταπονούμενων φυτών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση στο ορατό πιθανότατα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης μόνο όταν αυτή καθίσταται έντονη. Παρόμοιες απόψεις έχουν εκφραστεί και από τους Hunt και Rock (1989), Penũelas κ.α. (1993) και Inoue και Penũelas (2006). Φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών τύπου PRI και NDVI βρέθηκε να παρουσιάζουν σε ορισμένες περιπτώσεις καλή συσχέτιση με το περιεχόμενο του υποστρώματος σε νερό ή με δείκτες φυσιολογικής κατάστασης (στοματική αγωγιμότητα) και υδατικής καταπόνησης (CWSI). Στην καλλιέργεια ρόκας βρέθηκε καλή γραμμική συσγέτιση μεταξύ sPRI και CWSI. Σε κάθε περίπτωση όμως, η χρήση μίας τέτοιας σχέσης για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης με στόχο τον αυτόματο έλεγχο της άρδευσης μέσα σε θερμοκήπια οδηγεί σε προβληματισμούς καθώς η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τόσο τις τιμές του PRI (Sarlikioti κ.α., 2010) όσο και του CWSI (Katsoulas, 2002).

Η αξιοποίηση πολυφασματικών φυτικών δεικτών αποτελεί ένα υποσχόμενο πεδίο έρευνας καθώς θα μπορούσε να οδηγήσει σε άμεσες και αντιπροσωπευτικές μεθόδους για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Όταν ένα τυπικό σύστημα αυτόματου ελέγχου άρδευσης χρησιμοποιεί ως είσοδο το χρονικό ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετριέται με ένα πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου, δεν λαμβάνεται υπόψη η υδατική και φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας. Παρόλα αυτά, απαιτείται επιπλέον έρευνα προκειμένου τα συστήματα ελέγχου της άρδευσης στο μέλλον να λάβουν υπόψη και τις τιμές ανάκλασης της ακτινοβολίας από τα φυτά προκειμένου να γίνεται ο προγραμματισμός της άρδευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Graeff, S., Claupein, W., 2007. Identification and discrimination of water stress in wheat leaves (*Triticum aestivum L.*) by means of reflectance measurements. Irr. Sci. 26, 61–70.
- Granta, O.M., Chavesa, M.M., Jones, H.G., 2006. Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. Phys. Plant. 127, 507–518.

- Hatfield JL, Kanemasu ET, Asrar G, Jackson RD, Pinter PJ Jr, Reginato RJ, Idso SB. 1985. Leaf-area estimation from spectral measurements over various planting dates of wheat. International Journal of Remote Sensing 6(1): 167–175.
- Hunt, E.R., Rock, B.N. Jr., 1989. Detection of changes in leaf water content using nearand middle-infrared reflectances. Rem. Sens. Env. 30, 43-54.
- Inoue, Y., Penũelas, J., 2006. Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index in soybean leaves as affected by soil water content. Int. J. Rem. Sens. 27, 5109-5114.
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J. Jr., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17 (4), 1133–1138.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. J. Exp. Bot. 55 (407), 2427-2436.
- Jones, H.G., Schofield, P., 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. Gen. Appl. Plant Phys. 34(1-2), 19-32.
- Kacira, M., Sase, S., Okushima, L., Ling, P.P., 2005. Plant responce-based sensing for control strategies in sustainable greenhouse production. J. Agric. Meteorol. 61 (1), 15-22.
- Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G., Lykas, Ch. 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. Bios. Eng. 93, 237-244.
- Knipling, E.B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. Rem. Sens. Env. 1, 155-159.
- Nantt, D., 2008. CropScan (http://www.cropscan.com/). Προσωπική επικοινωνία.
- Norikane, J.H., Kurata, K., 2001. Water stress detection by monitoring fluorescence of plants under ambient light. Trans. ASAE. 44 (6), 1915–1922.
- Penũelas, J., Biel C., Serrano, L., Save, R., 1993. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water stress. Int. J. Rem. Sens. 14, 1887–1905.
- Peñuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., Field, C.B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. Rem. Sens. Env. 48, 135-146.
- Sarlikioti, V., Driever, S.M., Marcelis, L.F.M., 2010. Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress. Ann. Appl. Biol. 157, 81–89.
- Suárez, L., Zarco-Tejadaa, P.J., Bernia, J.A.J., Gonzalez-Dugoa, V., Fereresa, E. 2009. Modeling PRI for water stress detection using radiative transfer models. Rem. Sens. Env. 113 (4), 730-744.
- Thenkabail PS, Smith RB, Pauw ED. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sensing Environment 71: 158–182.
- Zakaluk, R., Sri Ranjan, R., 2008. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance. Can. Bios. Eng. 50, 7.1-7.12

ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Θ. Μπαρτζάνας¹, Ν. Κατσούλας², Ε. Κίττα¹, Α. Τσουκνίδας¹, Χ. Νικολάου¹, Κ. Κίττας^{1,2},

¹Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης Αγρο-Οικοσυστημάτων, Βόλος

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τμήμα Γεωπονίας. Φυτ. Παρ/γής και Αγρ. Περ/ντος. Εργαστήριο Γεωργικών Κατ/ών και Ελέγχου Περ/ντος, Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται πειραματικά η επίδραση δύο νέων φύλλων πολυαιθυλενίου για κάλυψη θερμοκηπίων, ενός με υψηλό συντελεστή ανάκλασης και απορρόφησης στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR-PE) και ενός με μικρό συντελεστή διαπερατότητας στην υπέρυθρη ακτινοβολία (IR-PE), στο μικροκλίμα και την κατανάλωση ενέργειας και την αύξηση και ανάπτυξη υδρονπονικής καλλιέργειας τομάτας. Οι μετρήσεις έγιναν σε τρία όμοια θερμοκήπια, το ένα εκ των οποίων ήταν καλυμμένο με ένα κοινό φύλλο C-PE. Βρέθηκε ότι σε σύγκριση με το C-PE τα IR-PE και NIR-PE είχαν 75% και 78% αντίστοιχα χαμηλότερη διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία, ενώ παράλληλα το NIR-PE είχε 42% υψηλότερη ανακλαστικότητα στην ΝIR. Το NIR-PE υλικό μείωσε έως και 2°C τη θερμοκρασία του αέρα σε σχέση με το C-PE. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας ήταν 10% μικρότερη στο IR-PE θερμοκήπιο. Η συνολική παραγωγή ανά m² ήταν παρόμοια, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των θερμοκηπίων.

Λέξεις Κλειδιά: Υπέρυθρη ακτινοβολία, κατανάλωση ενέργειας, δροσισμός, υλικό κάλυψης

USE OF THERMAL AND REFLECTIVE POLYETHYLENE FILMS FOR GREENHOUSE COVERING

T.Bartzanas¹, N. Katsoulas², E.Kitta², A. Tsouknidas¹, Ch. Nikolaou¹, C. Kittas^{1,2}

¹Centre for Research & Technology-Thessaly, Institute of Technology and Management of Agricultural Ecosystems, Volos

²University of Thessaly, School of Agricultural Sciences, Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, Volos

ABSTRACT

Two new polyethylene (PE) films with high reflectance and absorption in near infrared radiation (NIR-PE film) and of a PE film with low transmittance in infrared radiation IR (IR-PE film) were used for greenhouse covering and its effects on greenhouse microclimate and energy consumption and on growth and production of a hydroponic tomato crop were studied and compared with the results obtained from a greenhouse covered by a common C-PE film. Compared to the C-PE, the IR and NIR PE films had 75% and 78% lower transmittance in IR, while the NIR-PE had 42% higher reflectance in NIR. The result showed that the NIR-PE reduced air temperature up to 2°C. Energy consumption was 10% lower in the IR-PE than in the C-PE covered greenhouse. The total production per m² had no significant differences between the three greenhouses.

Keywords: infrared radiation, energy consumption, cooling, covering material

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ορθολογική διαχείριση και η εξοικονόμηση ενέργειας σε θερμοκηπία έχει αποτελέσει το θέμα αρκετών ερευνών τα τελευταία χρόνια, αρχικά λόγω των μειωμένων αποθεμάτων ορυκτών πόρων και της αύξησης της τιμής του πετρελαίου και τελευταία και για περιβαλλοντικούς λόγους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση με τη συνθήκη του Kyoto έχει θέσει αυστηρούς όρους για τη χρησιμοποίηση ορυκτών καυσίμων αλλά και τις εκπομπές CO₂ που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω υπάρχει μια συνεχής προσπάθεια για την ανάπτυξη νέων τεχνικών και τεχνολογιών για εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων είναι η κυριότερη ενεργειακή διεργασία και αυτή με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Για την Ιταλία έχει υπολογιστεί πως το κόστος της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση φτάνει το 20-30% του συνολικού κόστους παραγωγής (De Pascuale and Maggio, 2004), ενώ το ποσοστό είναι 22% για τη Γαλλία (Boulard, 2001) ποσοστό κοντά σε αυτό των Βορείων χωρών (van der Knijff et al., 2004). Στην Ολλανδία τα θερμοκηπία χρησιμοποιούν το 12.5% της ετήσιας κατανάλωσης φυσικού αερίου, κάτι το οποίο συνεπάγεται ανάλογα ποσοστά έκλυσης CO₂ (Bot, 2001). Η κυριότερη διαδικασία απώλειας ενέργειας από το θερμοκηπίου είναι μέσω αγωγής και ακτινοβολίας από το υλικό κάλυψης. Αν οι απώλειες αυτές μειώνονταν αποτελεσματικά τότε θα μειώνονταν σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς νέα καινοτόμα υλικά κάλυψης είναι ίσως το πρώτο βήμα για να δημιουργήσουμε ενεργειακά αειφορικά θερμοκήπια. Πλαστικά υλικά κάλυψης τα οποία μειώνουν τη μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη μείωση των απωλειών θερμότητας κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Η αποτελεσματικότητα διαφόρων τύπων υλικών κάλυψης θερμοκηπίου στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μελετήθηκε συστηματικά κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1980 και 1990 λόγω των υψηλών τιμών του πετρελαίου (Noble and Holder, 1989). Οι έρευνες επεκτάθηκαν πέρα από την κατανάλωση ενέργειας και στην αύξηση και ανάπτυξη των καλλιεργειών όπως και στην επίδραση σε άλλες παραμέτρους του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. (Papadopoulos and Xa, 1997). Οι Cemek et al. (2006) εξέτασαν ένα νέο ΡΕ φύλλο κάλυψης με απορροφητικά μόρια στην ΙR ακτινοβολία το οποίο συγκρινόμενο με ένα κοινό φύλλο ΡΕ οδήγησε σε 50% εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, συγκρινόμενο με ένα διπλό φύλλο ΡΕ, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση του θερμοκηπίου με το νέο φιλμ ήταν 10% μεγαλύτερη.

Αν και τα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων που περιέχουν μόρια για απορρόφηση της ΙR ακτινοβολίας είναι γενικά 15% ακριβότερα από τα κοινά υλικά κάλυψης, πρόσφατες ενεργειακές επιθεωρήσεις που έγιναν στο Michigan έδειξαν πως ο χρόνος απόσβεσης σε μια τέτοια επένδυση ήταν λιγότερο από ένα έτος λόγω των ποσών που εξοικονομούνταν από τις μειωμένες απαιτήσεις σε ενέργεια (Runkle, 2008). Με τις ολοένα και αυξανόμενες τάσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων αλλά και τις επιταγές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μειωμένες εκπομπές αεριών του θερμοκηπίου και προστασία του περιβάλλοντος υπάρχει συνεχές ενδιαφέρον τόσο των αγροτών για τη χρήση τέτοιων υλικών όσο και των κατασκευαστών υλικών κάλυψης για τη βελτιστοποίηση τους αλλά και την πειραματική επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας τους σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών κλιματικών συνθηκών και διαφορετικών καλλιεργειών.

Συνεπώς, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης νέων φύλλων ΡΕ κάλυψης θερμοκηπίων με υψηλό συντελεστή ανάκλασης και απορρόφησης στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR-PE υλικό) και μικρό συντελεστή διαπερατότητας στην υπέρυθρη ακτινοβολία (IR-PE υλικό), στο μικροκλίμα και την κατανάλωση ενέργειας και την αύξηση και ανάπτυξη υδρονπονικής καλλιέργειας τομάτας.

2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικά θερμοκήπια και καλλιέργεια

Τα πειράματα έγιναν κατά την περίοδο 2009-2010, στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, σε τρία όμοια τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια έκτασης 160 m² το καθένα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θερμοκηπίων ήταν: μήκος 20 m, πλάτος 8 m, ύψος ορθοστάτη 2.4 m, ύψος κορφιά 4.1 m. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό. Ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και καλύφθηκε με κοινό πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου (PE). Τα άλλα δύο θερμοκήπια καλύφθηκαν το ένα με υλικό κάλυψης με υψηλό συντελεστή ανάκλασης και απορρόφησης στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR-PE υλικό) και το άλλο με υλικό κάλυψης με μικρό συντελεστή διαπερατότητας στην υπέρυθρη ακτινοβολία (IR-PE υλικό).

Τα θερμοκήπια ήταν εξοπλισμένα με συνεχή πλαϊνά ανοίγματα αερισμού το οποία ήταν τοποθετημένα 0.6 m από την επιφάνεια του εδάφους. Το σύστημα αερισμού ενεργοποιούταν όταν η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ξεπερνούσε τους 23°C ενώ το μέγιστο άνοιγμα όταν η θερμοκρασία έφτανε στους 28°C. Η θέρμανση των θερμοκηπίων γινόταν με αερόθερμα και επιδαπέδιους σωλήνες θέρμανσης, με τη θερμοκρασία του αέρα να διατηρείται στους 15°C κατά τη διάρκεια της νύχτας και τους 17°C κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στο θερμοκήπιο εγκαταστάθηκε τον Φεβρουάριο του 2009 υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (Lycopersicon esculentum, var. Lorelay) σε υπόστρωμα περλίτη. Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε τέσσερις διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης 0.33 m επί της γραμμής και 0.75 m μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς, με πυκνότητα 2.1 φυτά/m². Η άρδευση και λίπανση της καλλιέργειας γινόταν αυτόματα με σύστημα ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή, με τιμές στόχους για την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH 2.5 dS m⁻¹ και 5.5, αντίστοιχα.

2.2. Μετρήσεις

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

- Έξω από το θερμοκήπιο: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα (model H08-032-08, HOBO instruments, Bourne, MA, U.S.A.) και η ολική ηλιακή ακτινοβολία (model CM-6, Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands).
- Μέσα στα θερμοκήπια: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα (model H08-032-08, HOBO instruments, Bourne, MA, U.S.A.), η ολική και καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (Kipp and Zonen, Delft, the Netherlands), η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας (thermocouple, Type T, 0.1 mm) και η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας των καλυμμάτων της οροφής (thermistor) και η ενέργεια που απέδιδε το σύστημα θέρμανσης.
- Οι οπτικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης μετρήθηκαν εργαστηριακά σε δύο περιόδους στην έναρξη της καλλιέργειας και στο τέλος της καλλιέργειας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν, με τη χρήση ενός φασματοραδιόμετρου (LICOR 1800) το οποίο ήτα εξοπλισμένο με μια λάμπα αλογόνου έντασης 10 W και με μια εξωτερική σφαίρα ολοκλήρωσης (LI-1800-12S). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για εύρος φάσματος 400 έως 1100 nm ανά 2 nm.
- Όσο αφορά την καλλιέργειας πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές μετρήσεις σε 8 τυχαία επιλεγμένα φυτά ανά θερμοκήπιο 8 φορές κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου στη διάρκεια των οποίων καταγράφονταν ο αριθμός των κόμβων, το μήκος και το πλάτος των φύλλων. Η συγκομιδή, κατά τη διάρκεια της

οποίας καταγραφόταν ο αριθμός και το βάρος των καρπών γινόταν 2 φορές κάθε εβδομάδα με ημερομηνία εκκίνησης την 4 Μαΐου 2009.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Οπτικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης

Οι οπτικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης όπως υπολογίστηκαν στο εργαστήριο με τη χρήση του φορητού φασματοραδιομέτρου και της σφαίρας ολοκλήρωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Το NIR-PE υλικό ανακλά 39% περισσότερο από το C-PE υλικό και 33% περισσότερο από το IR-PE υλικό στο φάσμα της ακτινοβολίας μεταξύ 400 nm και 1100 nm. Το NIR-PE υλικό είχε 13% μικρότερη διαπερατότητα στην ολική ακτινοβολία σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά κάλυψης (IR-PE C- PE). Τέλος το NIR-PE υλικό είχε 57% υψηλότερη απορροφητικότητα σε σχέση με το C- PE υλικό. Η επανάληψη των ανωτέρω μετρήσεων στο εργαστήριο σε διαφορετικές χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδους είχε ως αποτέλεσμα τιμές παραπλήσιες με αυτές που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Οπτικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης (REF: ανακλαστικότητα, TRA: διαπερατότητα και ABS: απορροφητικότητα)

	NIR-PE			-	IR-PE			C-PE	
Wavelength, nm	REF	TRA	ABS	REF	TRA	ABS	REF	TRA	ABS
400-500	0.20	0.72	0.06	0.15	0.82	0.02	0.14	0.84	0.02
600-700	0.19	0.75	0.07	0.13	0.85	0.02	0.12	0.86	0.02
700-800	0.18	0.75	0.08	0.12	0.85	0.02	0.11	0.86	0.03
400-700	0.19	0.74	0.06	0.14	0.84	0.02	0.13	0.85	0.02
400-1100	0.18	0.75	0.07	0.12	0.85	0.02	0.11	0.86	0.03
700-1100	0.17	0.76	0.07	0.11	0.86	0.03	0.11	0.87	0.02

3.2. Μικροκλίμα θερμοκηπίου και κατανάλωση ενέργειας

Συνολικά το θερμοκήπιο που ήταν καλυμμένο με το IR-PE υλικό χρειάστηκε λιγότερη ενέργειας σε σχέση με το C-PE θερμοκήπια για τη διατήρηση της ίδιας θερμοκρασίας του αέρα. Όσο αφορά τις μεταβολές της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας από ότι τη νύχτα. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, του ελλείμματος κορεσμούς του αέρα (VPD) και την κατανάλωσης ενέργειας. Και στα τρία θερμοκήπια ή μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού ήταν μικρότερη από 0.4 kPa. Σημειώνεται πως η τιμή των 0.5 kPa θεωρείται συχνά το όριο για βέλτιστη παραγωγή χωρίς προβλήματα από υγροποιήσεις και χρησιμοποιείται ως σημείο στόχος (set-point) για την έναρξη της διαδικασίας αφύγρανσης. Έχει επίσης βρεθεί πως τιμές του ελλείμματος κορεσμού μικρότερες από 0.5 kPa, ευνοούν την ανάπτυξη και ταχύτατη εξάπλωση του μύκητα Botrytis cinerea (Analytis, 1977). Ο έλεγχος συμπυκνώσεων στην επιφάνεια της καλλιέργειας ελέγχθηκε υπολογίζοντας τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και του σημείου δρόσου του αέρα (αρνητικές τιμές οδηγούν σε συμπυκνώσεις). Η διαφορά θερμοκρασίας ήταν θετική υποδεικνύοντας πως δεν υπήρχαν συμπυκνώσεις στην επιφάνεια της καλλιέργειας. Ο ίδιος έλεγχος όμως στην εσωτερική επιφάνεια των καλυμμάτων οροφής έδειξε πως εκεί υπήργαν συμπυκνώσεις.

Οι μετρήσεις της καθαρής ακτινοβολίας στα τρία θερμοκήπια έδειξαν πως οι απώλειες της καθαρής ακτινοβολίας ήταν 35% μικρότερες στο θερμοκήπιο με το IR-PE υλικό σε σχέση με το θερμοκήπιο με το C-PE υλικό. Όσον αφορά την κατανάλωση

ενέργειας, για τη χειμερινή περίοδο η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για θερμοκήπιο έκτασης 1 ha ήταν:

- 3620 MJ για το θερμοκήπιο με το C-PE υλικό,
- 3270 MJ για το θερμοκήπιο με το NIR-PE υλικό και
- 3160 MJ για το θερμοκήπιο με το IR-PE υλικό

Πίνακας 2. Μέσες τιμές θερμοκρασίας του αέρα, του ελλείμματος κορεσμούς του αέρα και την κατανάλωσης ενέργειας.

	NIR-PE	IR-PE	C-PE	Εξωτερικό περιβάλλον
Θερμοκρασία αέρα (°C)	15.5 ± 0.7	15.2 ± 0.6	14.9 ± 0.6	7.9 ± 0.5
Έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa)	0.37 ± 0.1	0.36 ± 0.1	0.38 ± 0.1	0.85 ± 0.2
Κατανάλωση ενέργειας (kJ $m^{-2} day^{-1}$)	3350	3160	3620	-

3.3. Αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας

Από τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας των φυτών, βρέθηκε ότι τα φυτά του θερμοκηπίου με το IR-PE υλικό, είχαν στατιστικά μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια έναντι των φυτών των άλλων δύο θερμοκηπίων. Η μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια των φυτών του θερμοκηπίου με το IR-PE οφειλόταν τόσο στον μεγαλύτερο αριθμό ικανών φύλλων να συμμετέχουν στη φωτοσύνθεση, όσο και στη μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια ανά φύλλο των φυτών. Παρόμοια αποτελέσματα στη φυλλική επιφάνεια των φυτών τομάτας βρήκαν και οι Cemek et al. (2006) αλλά και οι Garcia et al. (2003) σε φυτά πιπεριάς σε θερμοκήπιο με υψηλή ανακλαστική ικανότητα στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία. Δεν βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών θερμοκηπίων για τα υπόλοιπα αγρονομικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας που μετρήθηκαν. Η συνολική παραγωγή (kg m⁻²) ήταν 12.12, 12.00 και 10.25, στα IR-PE, NIR-PE και C-PE θερμοκήπια, αντίστοιχα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής δοκιμάσθηκαν δύο νέα θερμικά (IR-PE) και ανακλαστικά (NIR-PE) της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας φύλλα πολυαιθυλενίου κάλυψης θερμοκηπίων και μελετήθηκε η αποτελεσματικότητά τους στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του θερμοκηπίου καθώς και η επίδρασή τους στην καλλιέργεια. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση ενός κοινού φύλλου πολυαιθυλενίου (C-PE). Σε σχέση με το κοινό φύλλο πολυαιθυλενίου, το IR-PE είχε 75% χαμηλότερη διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία, ενώ το NIR-PE είχε 78% χαμηλότερη διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία και 42% υψηλότερη ανακλαστικότητα στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR). Το NIR-PE υλικό μείωσε σημαντική την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα έως και 2°C σε σχέση με τη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο με το κοινό υλικό κάλυψης (C-PE).

Όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας, τα θερμοκήπια που ήταν καλυμμένα με τα νέα υλικά κάλυψης (NIR-PE και IR-PE) είχαν 12% μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το θερμοκήπιο που ήταν καλυμμένο με το C-PE. Η δημιουργία υγροποιήσεων στην εσωτερική επιφάνεια των καλυμμάτων της οροφής υποδεικνύει πως το προτεινόμενο σύστημα (με τα νέα υλικά κάλυψης) θα πρέπει να συνδυάζεται με ένα αποτελεσματικό σύστημα αφύγρανσης. Τέλος δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στη συνολική παραγωγή τομάτας μεταξύ των τριών θερμοκηπίων.
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arbel, A., Barak, M., and Shklyar, A., 2003. *Combination of Forced Ventilation and Fogging Systems for Cooling Greenhouses*, Biosystems Engineering, 84 (1): 45–55.
- Baille, A., 2001. Trends in greenhouse technology for improved climate control in mild winter climates, Acta Horticulturae 559: 161–168.
- Bartzanas, T., Kittas, C., and Boulard, T., 2004. *Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse*, Biosystems Engineering 88 (4): 479-490.
- Batchelor, G. K., 1967. An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press. Cambridge
- Boulard, T. and Wang. S., 2002. *Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel*, Comput. Electron. Agr. 34: 173–190
- Ferziger, J.H., Peric, M., 1996. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer. London.
- Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, T. and Kittas, C., 2008. *Flow characteristics and temperature patterns in a fan ventilated greenhouse*, Acta Horticulturae, 797: 123-130
 Fluent, FLUENT. v.5.3, 1998, Fluent Europe Ltd., Sheffield. UK.
- Kittas, C., Boulard, T. and Papadakis, G., 1997. *Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects*, Transactions of the ASAE 40 (2): 415–425.
- Kittas, C., Baille, A., 1998. Determination of the spectral properties of several greenhouse cover materials and evaluation of specific parameters related to plant response, Journal of Agricultural Engineering Research 71:193-202.
- Kittas, C., Boulard, T., Bartzanas, T., Katsoulas, N. and Mermier, M., 2002. *Influence of* an insect screen on greenhouse ventilation, Trans. ASAE 45 (4): 1083–1090.
- Kittas, C., Karamanis, M. and Katsoulas, N., 2005. Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop, Energy and Buildings 37: 807–812
- Launder B.E., Spalding D.B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Alvarez, A.J., Maduen, A., 2006. A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient, Biosystems Engineering 93, 447-457.
- Ould Khaoua, S., Bournet, A., Migeon, P.E., Boulard, T. and Chasseriaux, T., 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics, Biosystems Engineering, 95(1): 83-98.
- Raithby, G.D., Chui, E.H., 1990. A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat *Transfer in Enclosures with Participating Media*, Transactions of ASME Journal of Heat Transfer 112: 415-423.
- Tamamidis, P., Assanis, D.N., 1993. *Evaluation of various high order accuracy schemes with and without flux limiters*, Intl. J. for Numerical Methods in Fluids, 16: 931-948.
- Teitel, M., Tanny, J., Ben-Yakir, D., and Barak M., 2005. Airflow patterns through roof openings of a naturally ventilated greenhouse and their effect on insect penetration, Biosystems Engineering, 92 (3): 341-353.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995. An introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman, London.
- Willits, D.H., 2003. *Cooling Fan-ventilated Greenhouses: a modelling study*, Biosystems Engineering, 84 (3): 315–329