

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ (Ε.Γ.Μ.Ε.)

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

**6^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική
Βιοσυστημάτων στην εποχή των βιοκαυσίμων
και των κλιματικών αλλαγών**

Επιμέλεια Έκδοσης

Β. Αντωνόπουλος,

Π. Γεωργίου και Σ. Βουγιούκας

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

8-10 Οκτωβρίου 2009

Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής
Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική Βιοσυστημάτων στην εποχή των
βιοκαυσίμων και των κλιματικών αλλαγών

ISBN 978-960-6865-12-1

Η αναπαραγωγή των εργασιών έχει γίνει με απευθείας φωτοαντιγραφή και την ευθύνη για το υλικό κάθε εργασίας έχουν οι συγγραφείς.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ) ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1993 με έδρα την Αθήνα και είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωργικών Μηχανικών (EurAgEng). Η ΕΓΜΕ οργανώνει κάθε δύο έτη το Πανελλήνιο Συνεδρίο της.

Ο παρόν τόμος αποτελεί τα πρακτικά του 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της Γεωργικής Μηχανικής, που έλαβε χώρα στην Θεσσαλονίκη από 8-10 Οκτωβρίου 2009. Το θέμα του συνεδρίου ήταν «Η Γεωργική Μηχανική και η Μηχανική Βιοσυστημάτων στην εποχή των βιοκαυσίμων και των κλιματικών αλλαγών». Περιέχει 103 επιστημονικές ανακοινώσεις που παρουσιάστηκαν στο Συνέδριο. Όλες οι εργασίες κρίθηκαν από μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής και άλλους ειδικούς επιστήμονες. Το συνέδριο οργανώθηκε υπό την αιγίδα της Γεωπονικής Σχολής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και υποστηρίχθηκε από τα μέλη του Τομέα Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής.

Στο Συνέδριο δόθηκε η ευκαιρία στο Επιστημονικό δυναμικό της χώρας μας να παρουσιάσει την πρόοδο της Επιστήμης και τις νέες μεθόδους προσέγγισης σε αντικείμενα που αφορούν τη διαχείριση των υδατικών και εδαφικών πόρων, τα γεωργικά μηχανήματα, τις αγροτικές κατασκευές, την επεξεργασία γεωργικών προϊόντων, την ενέργεια, τις νέες τεχνολογίες και το περιβάλλον.

Η Γεωργική Μηχανική τα τελευταία χρόνια μετεξελίχθηκε σε Μηχανική Βιοσυστημάτων διεθνώς αλλά και στη χώρα μας. Στη Μηχανική Βιοσυστημάτων αξιοποιούνται οι αρχές της μηχανικής και της βιολογίας για να δοθούν λύσεις σε προβλήματα που αφορούν τους ζωντανούς οργανισμούς και το φυσικό περιβάλλον. Έχει σαν στόχο την εξασφάλιση των απαραίτητων εφοδίων για τη ζωή: ασφαλή και επαρκή τρόφιμα για τη διατροφή, πόσιμο καθαρό νερό, καθαρά καύσιμα και πηγές ενέργειας, ασφαλές και υγιές περιβάλλον για τη διαβίωση.

Οι δύο προκλήσεις των ημερών είναι τα βιοκαύσιμα και η κλιματική αλλαγή. Είναι δύο θέματα που βρίσκονται στο επίκεντρο των ενδιαφερόντων των Μηχανικών Βιοσυστημάτων. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζεται από τις δραστηριότητες της Γεωργίας, αλλά και επηρεάζει την παραγωγικότητα φυτών και ζώων. Οι αναμενόμενες μεταβολές στη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση, τη σχετική υγρασία, τα πλημμυρικά φαινόμενα και τη ξηρασία θα επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών και τη διαβίωση των ζώων και του φυσικού περιβάλλοντος, όπου αναπτύσσονται και εκτρέφονται. Η διαχείριση της καλλιέργειας των αγρών ιδιαίτερα σε οργανικά εδάφη και των αποβλήτων των ζώων, επιβάλλεται για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, N₂O, CH₄). Η παραγωγή και η χρήση των βιοκαυσίμων αυξάνει συνεχώς. Συνδέεται, όμως με τη αύξηση της ζήτησης των προϊόντων ορισμένων καλλιεργειών, όπως αραβοσίτου, γεγονός που έχει επιπτώσεις στις τιμές τους και μερικές φορές στην ενίσχυση του επισιτιστικού προβλήματος και την κατασπατάληση υδατικών και εδαφικών πόρων.

Εκφράζονται θερμές ευχαριστίες προς τα μέλη της Οργανωτικής και Επιστημονικής Επιτροπής του συνεδρίου, τους συγγραφείς και τους κριτές των εργασιών που αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο για την επιστημονικά αρτιότερη οργάνωση του συνεδρίου.

Προς την Επιτροπή Ερευνών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, το ΥΠΕΧΩΔΕ, το ΓΕΩΤΕΕ καθώς και τους άλλους χορηγούς και εκθέτες απευθύνονται ειλικρινείς ευχαριστίες για την οικονομική ενίσχυση που προσέφεραν ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία το παρόν συνέδριο.

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2009
Καθηγητής, Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή Συνεδρίου

Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ., πρόεδρος ΕΓΜΕ
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ., αντιπρόεδρος ΕΓΜΕ
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παυλάτου-Βε Α., Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Βουγιούκας Σ., Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., γραμματέας ΕΓΜΕ
Γεωργίου Π., Λέκτορας Α.Π.Θ., ταμίας ΕΓΜΕ
Τελόγλου Η., Επίκουρος Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
Ταμβακίδης Σ., Δρ. Γεωπόνος, υπάλληλος ΔΥ-ΠΚΜ
Εσκιάδης Δ., Πρόεδρος Εισαγωγέων-Κατασκευαστών Γεωργικών Μηχανημάτων
Ασχονίτης Β., Γραμματέας συνεδρίου

Επιστημονική Επιτροπή

Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Αντωνόπουλος Β., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Βουγιούκας Σ., Επικ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γέμτος Θ., Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργίου Π., Λέκτορας Α.Π.Θ.
Γιαννόπουλος Σ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Δαλέζιος Ν., Καθηγητής Π.Θ.
Ζήσης Θ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καραμούζης Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κατσούλας Ν., Λέκτορας Π.Θ.
Κερκίδης Π., Καθηγητής Γ.Π.Α
Κίττας Κ., Καθηγητής Π.Θ.
Λαμπρινός Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μαρτζόπουλος Γ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μισοπολινός Ν., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Μπριασούλης Δ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ., Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παναγάκης Π., Επικ. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παναγιωτόπουλος Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδάκης Γ., Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαμιχαήλ Δ., Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παρισόπουλος Γ., ΕΘΙΑΓΕ
Παυλάτου-Βε Α., Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., Καθηγήτρια Π.Θ.
Τσατσαρέλης Κ., Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

Αγγελοπούλου Κ.	Καλμπουρτζή Κ.	Μπόχτης Δ.
Ακριτίδης Κ.	Καλφούντζος Δ.	Μυστριώτης Α.
Αλεξίου Ι.	Κανακούδης Β.	Νάνος Γ.
Αλχανάκης Β.	Καραμούζης Δ.	Νάτσης Α.
Αλεξανδρίδης Θ.	Καραρίζος Π.	Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χ.
Αναγνωστόπουλος Π.	Καρπούζος Δ.	Ντιούδης Π.
Αναγνωστοπούλου Χ.	Καρυδάς Χ.	Ξανθόπουλος Γ.
Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε.	Κατσανίδης Ε.	Παναγάκης Π.
Αντωνόπουλος Β.	Κατσούλας Ν.	Παναγιωτόπουλος Κ.
Αραμπατζής Γ.	Κεραμίδας Β.	Παπαδάκης Γ.
Αργυροκαστρίτης Ι.	Κερκίδης Π.	Παπαδόπουλος Α.
Βαρζάκας Θ.	Κίττας Κ.	Παπαμιχαήλ Δ.
Βουγιούκας Σ.	Κολοκυθά Ε.	Παρισόπουλος Γ.
Βουδούρης Κ.	Κουνδουράς Σ.	Πατέρας Δ.
Βύρλας Π.	Κωστοπούλου Σ.	Παυλάτου-Βε Α.
Γέμτος Θ.	Κωτσόπουλος Θ.	Ράπτη Ε.
Γεωργίου Π.	Κωτσόπουλος Σ.	Σαπουντζής Μ.
Γιαννόπουλος Σ.	Λαζαρίδης Χ.	Σέμος Α.
Γιαννούλη Π.	Λαμπρινός Γ.	Ταμβακίδης Σ.
Γράβαλος Ι.	Λουκάς Α.	Τούλιος Λ.
Δαναλάτος Ν.	Μαλάμος Ν.	Τσατσαρέλης Κ.
Δεδούσης Α.	Μαμώλος Α.	Υψηλάντης Ι.
Δέρκας Ν.	Ματσή Θ.	Φερεντίνος Κ.
Δημητριάδης Α.	Μαυρογιαννόπουλος Γ.	Φουντάς Σ.
Διαμαντοπούλου Μ.	Μισοπολινός Ν.	Φράγκος Β.
Ελμαλόγλου Σ.	Μόσχου Δ.	Χατζηγιαννάκης Ε.
Ζαλίδης Γ.	Μπαμπατζιμόπουλος Χ.	Χρήστου-Βαρσακέλης Δ.
Ζήσης Θ.	Μπαρμπαγιάννης Ν.	Ψυχογιού Μ.
Καλαβρουζιώτης Ι.	Μπαρτζάνας Θ.	

Επικοινωνία – αλληλογραφία - πληροφορίες

Αντωνόπουλος Βασίλης

Καθηγητής Α.Π.Θ.

Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310-998745, 2310-998716, 2310-998752

Fax: 2310-998767

E-mail: vasanton@agro.auth.gr, egme2009@gmail.com

Internet: www.egme.gr, www.egme2009.web.auth.gr

EurAgEn: www.eurageng.org

ΧΟΡΗΓΟΙ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται από μέρους της Οργανωτικής Επιτροπής του Συνεδρίου στους χορηγούς και τους εκθέτες που βοήθησαν στην υλοποίησή του.



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΡΕΥΝΩΝ



Scientact a.E.



ΑΓΡΕΚ

Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.



ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ

Θερμότητα – Μεταλλικά Κτίρια - Εξοπλισμός
ΒΙ.Π.Ε.Θ ΣΙΝΔΟΥ Τ.Θ. 1144, 570 22 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
TEL. +30-2310-797001/3 FAX :+30-2310-797004
Web. www.geotherm.gr , E.mail : geotherm@otenet.gr

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ



Υδατικοί Πόροι

- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΝΕΡΟΥ – ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWBACROS
Χ. Καλλιτσάρη, Π. Γεωργίου και Χ. Μπαμπατζιμόπουλος 3
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΥΖΩΝΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΣ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ VAN GENUCHTEN
Β.Γ. Ασχονίτης και Β.Ζ. Αντωνόπουλος..... 11
- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΙΟΥ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ
ΚΑΙ ΣΤΗ ΒΑΘΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ
ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Ε. Διαμαντόπουλος και Σ. Ελμαλόγλου..... 19
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WAVE ΣΤΙΣ
ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ
Ι.Γ. Αλεξίου, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Β.Ζ. Αντωνόπουλος 27
- ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΓΡΟ ΥΠΟ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
SWMS_3D
Β.Ζ. Αντωνόπουλος και Σ.Α. Κωτσόπουλος..... 35
- ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SALTMED ΓΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ
ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Δ. Καλφούντζος, R. Ragab, Π. Βύρλας, Π. Καλφούντζος και Δ. Πατέρας 43
- ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΥ
ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΡΤΑΣ
Ι.Α. Τσιρογιάννης και Σ. Τριάντος..... 51
- ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ WET ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ
ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Γ. Κάργας και Π. Κερκίδης..... 59
- ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΕΣΣΕΡΕΙΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΟΥΣ ΜΗΝΕΣ ΣΤΗΝ
ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
Κ.Π. Μουστρής, Ι.Κ. Λαρίσση και Α.Γ. Παλιατσός..... 67
- ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΓΝΩΣΕΙΣ
ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ι. Πυθαρούλης..... 75
- ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ
Γ. Δημόκας, Κ. Κίττας και Μ. Tchamitchian 83
- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
Χ. Ράπτη, Χ. Ευαγγελίδης και Γ. Αραμπατζής 91
- ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΦΛΩΡΙΝΑΣ
Β.Θ. Αμπας, Ε.Α. Μπαλτάς, Δ.Μ. Παπαμιχαήλ και Π.Ε. Γεωργίου..... 99

- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΙΟΝΗΣΗΣ ΔΥΟ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ
ΗΛΙΑΝΘΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ
*Ι. Αργυροκαστρίτης, Σ. Φραγκίστα, Χ. Βαμβακούλας, Θ. Δαμιανίδης,
Σ. Αλεξανδρή και Π. Παπαστυλιανού..... 107*
- ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΓΙΑ
ΠΑΤΑΤΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΚΑΔΙΑ
Ν. Προύτσος, Α. Λιακατάς, Α. Κοτρώζου και Σ. Αλεξανδρή..... 115
- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ) ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΛΙΒΑΔΙΟΥ ΛΑΡΙΣΗΣ
Π. Καρασαββίδης, Χ. Τζιμόπουλος και Χ. Ευαγγελίδης..... 123
- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ
ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ
ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΣΤΟΥ
Χ. Τζιμόπουλος, Σ. Γιαννόπουλος και Χ. Ευαγγελίδης..... 131
- ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ BOUSSINESQ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ
Η. Τελόγλου και Θ. Ζήσης..... 139
- ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ
ΔΙΑΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ TOKSÖZ - KIRKHAM
Μ.Ε. Θεοχάρης 147
- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ
ΠΡΕΣΠΙΑΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ
Γ. Παρισόπουλος, Μ. Μαλακού, Γ. Σαουντζάκης και Μ. Γιαμούρη 155
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΙΣ
ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ
Κ. Σούλης, Π. Λόντρα, Δ. Αλωνιστιώτη, Ε. Πολλάλης και Ι. Βαλιάντζας..... 163
- ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ
ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
Κ. Χατζηπαραδείση, Κ. Τολίκα και Ν. Θεοδοσίου..... 171

Εδαφικοί Πόροι

-
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΒΕΣΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΝΡΚ ΣΤΗ
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΠΝΟΥ
(VIRGINIA) ΣΕ ΟΞΙΝΑ ΕΔΑΦΗ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Ε. Σταυρινός, Α. Δημήτρου, Γ. Ζαλίδης, Ν. Μισσοπολινός, Γ. Μπίλας..... 181
 - ΧΡΗΣΗ ΦΥΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ ΚΑΛΑΜΙΩΝΕΣ (*Phragmites australis*) ΓΙΑ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΟΜΠΟΣΤΑΣ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ
Α. Τουμπέλη, Α. Παυλάτου-Βε, Σ. Κωστοπούλου, Α. Μαμώλος και Κ. Καλμπουρτζή..... 189
 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΤΗ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ
ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΕΝΟΣ ΑΛΑΤΟΥΧΟΥ-ΝΑΤΡΙΩΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
Σ.Κ. Κωστοπούλου και Σ. Τάτσης 197
 - ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ USLE ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ
Δ. Πατέρας, Χ. Τερζούδη και Θ. Γέμτος 205
 - ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΕ ΟΞΙΝΑ ΚΑΙ ΑΣΒΕΣΤΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ
Β. Αντωνιάδης, Δ. Μπαχτσεβανίδης και Φ. Χαντζής 213

- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΤΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΜΑΛΩΝ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ
Π.Σ. Βαγγελάτου, Θ.Ε. Σιμιτοπούλου και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 221
- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΚΡΙΘΑΡΙ
Χ. Πασχαλίδης, Β. Καββαδίας, Δ. Πετρόπουλος, Α. Κορίκη και Α. Πανδής..... 229
- ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ
Χ. Χαλβατζής και Ι.Κ. Καλαβρουζιώτης 235

Υπολογιστικά Μοντέλα στη Γεωργική Μηχανική

- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΞΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΤΟΞΩΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ
Δ.Α. Κατέρης, Ι.Ν. Ντάντος, Σ. Παπουτσή–Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος..... 245
- ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ (H-ADCP)
Σ. Βουγιούκας, Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου και Δ. Παπαδήμος..... 253
- ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
Ι.Ν. Ντάντος, Δ.Α. Κατέρης, Σ. Παπουτσή–Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος..... 261
- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ & ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ
Κ. Μπαζεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Δ. Παπαναστασίου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας 269
- ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΤΥΠΙΚΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ
Θ. Μπαρτζάνας, Δ. Φεΐδαρος, Α. Μπαζεβάνου και Κ. Κίττας..... 277
- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΝΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ
Δ. Φεΐδαρος, Κ. Μπαζεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας..... 285

Τεχνολογία Περιβάλλοντος

- ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΗ ΚΑΙ ΜΕ ΜΑΚΡΟΦΥΤΑ (DUCKWEED) ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΟΘΡΟΛΥΜΑΤΩΝ
Φ.Η. Παπαδόπουλος και Β.Α. Τσιχριντζής 295
- ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΣ ΑΞΙΑΣ
Φ.Δ. Γάλλιον, Δ.Κ. Καρπούζος και Δ. Καραμούζης 303
- ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΕΥΡΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Α. Πανώρας, Α. Ηλίας, Ε. Χατζηγιαννάκης, Γ. Αραμπαζής, Α. Ζδράγκας, Α. Παναγόπουλος, Σ. Σωτηράκη, Η. Παρούσης, Γ. Πανώρας, Θ. Μπόγιας, Α. Σουπίλας και Α. Νούλα..... 311
- ΑΖΩΤΟΥΧΟΣ ΛΙΠΑΝΣΗ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
Ν. Δαναλάτος, Σ. Αρχοντούλης, Δ. Μπαρτζιάλης, Α. Σιάνου, Δ. Ζαϊτούδης..... 321
- ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Δ. Μπριασούλης, Μ. Χισκάκης, Ε. Μπάμπου, Σ. Αντίοχος και Κ. Παπάδη..... 329

- ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΦΥΤΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]
Α.Β. Κουβέλας και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 341
- ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΣΜΟ
Δ.Κ. Παπαναστασίου, Δ. Φεΐδαρος, Α. Μπαζεβάνου, Θ. Μπαρτζάνας και Κ. Κίττας..... 349
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΜΑΛΩΝ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
Θ.Ε. Σιμιτοπούλου, Π.Σ. Βαγγελάτου και Κ.Χ. Αγγελόπουλος..... 357

Οικονομικά Θέματα Γεωργικής Μηχανικής

- ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ
ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ
Α.Γ. Λιάπης, Π.Ε. Γεωργίου και Δ.Μ. Παπαμιχαήλ..... 367
- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΩΝ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΤΙΜΟΛΟΓΙΑΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ
Δ. Παγίδης και Δ. Λατινόπουλος..... 375
- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΡΔΕΥΣΗΣ
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Ε. Μυγδάκος και Χ. Παπανικολάου..... 383
- ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ
ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ
Π. Γεωργίου και Κ. Βουδούρης..... 391
- ΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ
ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Α. Ταγαράκης, Χ. Καραμούτης, Χ. Καβαλάρης, Ε. Μυγδάκος και Θ.Α. Γέμτος..... 399
- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΛΑΧΑΝΟΥ:
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
Ε. Μυγδάκος, Α. Ρεζίτης, Ι. Σωτηρόπουλος και Μ. Ζώζουλα..... 407
- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2006-2007
Ε. Μυγδάκος, Α. Ρεζίτης και Χ. Κελεπούρης..... 415

Γεωργικά Μηχανήματα - Εξοπλισμοί

- ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΘΙΣΜΑ ΤΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΔΙΣΚΟΣΒΑΡΝΑ
*Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ι. Γράβαλος, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος,
Χ. Δημητριάδης, Κ.Α. Τσατσαρέλης και Θ.Α. Γέμτος*..... 425
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL
Ι. Γράβαλος, Ζ. Τσιρόπουλος, Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης και Π. Ξυραδάκης..... 433
- ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
Ι. Γράβαλος, Θ. Γιαλαμάς, Δ. Κατέρης, Ζ. Τσιρόπουλος και Π. Ξυραδάκης..... 441
- Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ
ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΒΑΝΤΑ
Χ.Ι. Δημητριάδης, J.L. Brighton, Ι.Φ. Κόκκορας, Μ.Ι. Κόκκορα και Θ. Γιαλαμάς..... 449
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ
ΔΙΣΚΟΣΒΑΡΝΑ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ
Χ.Κ. Κοτσακιώτη και Κ.Α. Τσατσαρέλης..... 457

• ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ <i>Α. Σβέρκου, Α. Νάτσης, Γ. Λαμπρινός και Θ.Α.Γέμτος</i>	465
• ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΘΙΣΜΑ ΤΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΡΟΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ <i>Θ.Α. Γιαλαμάς, Ι. Γράβαλος, Δ. Κατέρης, Π. Ξυραδάκης, Ζ. Τσιρόπουλος, Κ.Α. Τσατσαρέλης, Δ. Μόσχου και Θ.Α. Γέμτος</i>	471
• ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΗΛΙΕΛΑΙΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ & ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>Α. Μπαλαφούτης, Α. Παπαγιαννοπούλου, Α. Γερονικολού, Α. Νάτσης και Γ. Παπαδάκης</i>	479
• ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ <i>Σ. Πασιτόπουλος, Σ. Φουντάς και Θ. Γέμτος</i>	489
• ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΩΘΗΤΗ ΓΑΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΜΟΧΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Π.Β. Καραρίζος, Ε.Α. Καραγιάννης, Ε.Ν. Λάμπου και Μ.Γ. Καλαϊτζή</i>	497
• ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Ε.Α. Καραγιάννης, Π.Β. Καραρίζος, Ε.Ν. Λάμπου και Κ.Π. Ζάννης</i>	505
• ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ <i>Ε.Α. Καραγιάννης, Π.Β. Καραρίζος, Ε.Ν. Λάμπου και Μ.Γ. Καλαϊτζή</i>	513
• ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΝΘΟΥ <i>Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης και Θ.Α. Γέμτος</i>	521
• ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ <i>Ι.Γ. Αμπατζίδης, Ι.Α. Σπανομήτρος και Δ.Χ. Χατζημπεντέλης</i>	531

Αγροτικές Κατασκευές

• ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ <i>Χ. Παπαϊωάννου, Ν. Κατσούλας και Κ. Κίττας</i>	541
• ΣΥΜΒΟΛΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΩΣ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ <i>Γ. Ντίνας και Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου</i>	549
• ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ <i>Α. Γιαννούλης, Α. Μυστριώτης και Δ. Μπριασούλης</i>	557
• ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΔΡΟΡΡΟΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ <i>Γ. Ντίνας, Ε. Καρανίκας και Χ. Νικήτα-Μαρτζοπούλου</i>	567
• ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ <i>Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Χ. Λύκας και Μ. Τσετσελίδου</i>	575

- ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ ΚΑΙ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΦΑΠΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (BATCH DIGESTERS) ΣΤΗ ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΖΩΝΗ
Π. Κούγιας, Α. Βέργος, Θ. Κωτσόπουλος και Γ. Μαρτζόπουλος 583

Νέες Τεχνολογίες στη Γεωργική Μηχανική

- ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟ
Ι.Γ. Αμπατζίδης και Σ.Γ. Βουγιούκας..... 593
- ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΗΛΙΑΣ ΜΕ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ
Α.Α. Κουτσοστάθης, Δ. Μπόχτης, Α. Αγγελόπουλου, Σπ. Φουντάς και Θ. Γέμτος 601
- ΒΑΘΜΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΠΟΡΟΦΥΤΩΝ ΤΟΜΑΤΑΣ
Κ. Πεπονάκης, Ν. Κατσούλας και Κ. Κίττας 609
- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΝΩΠΩΝ ΚΑΡΠΩΝ ΟΠΩΡΟΦΟΡΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ
Ι.Γ. Αμπατζίδης και Σ.Γ. Βουγιούκας..... 617
- ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΙΑ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ
Σ. Φουντάς, Κ. Μπουλουλή, Κ. Αγγελοπούλου, Ν. Γιαννόπουλος, Θ. Γέμτος, Γ. Νάνος, Α. Παρασκευόπουλος και Μ. Γαλάνης..... 625
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ ΦΥΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΡΑΣΜΟΥ ΠΟΛΥΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
Δ. Μόσχου..... 633
- ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΤΟΝ LGR ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ
Α. Ξενάκης, Α. Περλεπές, Π. Κίκiras και Γ. Σταμούλης..... 641
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ Π. ΣΤΡΥΜΟΝΑ ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΣΤΡΕΦΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
Χ. Καρυδάς, Β. Αντωνόπουλος, Γ. Ζαλίδης, Δ. Παπαμιχαήλ και Ν. Συλλαίος..... 649
- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΑ
Γ. Στουγιάννης, Α. Περλεπές, Σ. Φουντάς, Θ.Α. Γέμτος και Π. Κίκiras..... 657
- ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ
Δ.Δ. Μπόχτης, S.G. Sørensen, O. Green, A. Klose και K.A. Andersen..... 665
- ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΥΡΩΣΤΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ
Α.Γ. Σολδάτος, Σ.Γ. Σαφαρίδης και Κ.Γ. Αρβανίτης 673
- ΧΡΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΦΩΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΡΑΧΙΔΑΣ
Α. Περιστέρόπουλος, Γ. Βελλίδης, Σ. Φουντάς και Θ.Α. Γέμτος..... 681

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εξοικονόμηση Ενέργειας στη Γεωργία

- ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ
Χ. Καβαλάρης, Χ. Καραμούτης, Α. Ταγαράκης και Θ.Α. Γέμτος 691

• Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΡΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑ <i>Θ.Α. Γέμτος, Χρ. Καβαλάρης, Χρ. Καραμούτης και Σπ. Φουντάς</i>	699
• ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΟΡΓΟΥ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ <i>Χ. Παπανικολάου και Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη</i>	707
• ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ <i>Κ.Χ. Αγγελόπουλος, Α.Β. Κούβελας, Α. Καμπράνης, Α.Ν. Θεοδωρακοπούλου</i>	715
• ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΥΡΟΓΑΛΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΥΓΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ <i>Αν. Κακούρος, Δ. Γεωργακάκης και Β. Φούντα</i>	721
• ΝΕΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ <i>Α. Λεβέντη και Γρ. Λαμπρινός</i>	729
• ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ <i>Μ. Χιονίδης και Γρ. Λαμπρινός</i>	737

Μετασυλλεκτική – Μετασυγκομιστική Τεχνολογία

• Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ» ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ <i>Α. Χριστόπουλος, Κ. Ρεκούμη και Ε. Μανωλοπούλου</i>	747
• ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΝΩΠΩΝ ΚΑΡΠΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΨΕΥΔΟΚΑΡΠΟΥ <i>Γ.Δ. Νάνος, Στ. Λεοντόπουλος και Θ. Γέμτος</i>	755
• Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΗΛΩΝ ΑΠΟ ΜΩΛΩΠΙΣΜΟΥΣ <i>Γ.Δ. Νάνος, Σ. Λεοντόπουλος και Θ. Γέμτος</i>	763
• ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΧΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟ ΑΕΡΑ ΕΔΩΔΙΜΟΥ ΜΑΝΙΤΑΡΙΟΥ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Θ. Σωτηριάδης, Ε. Π. Αγγλογάλλος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	771
• ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΣΕ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ ΑΛΙΕΥΜΑΤΩΝ <i>Ε.Γ. Χατζής, Κ.Δ. Σιαφαρίκας και Στ. Ψυχογιού</i>	779
• ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ» ΜΗΛΩΝ <i>GOLDEN DELICIOUS</i> ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ <i>Ε.Γ. Χατζής, Ε. Μανωλοπούλου, Ε. Αραβαντινός-Καρλάτος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	787
• ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΤΟΜΙΚΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΑΝΙΤΑΡΙΩΝ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Ε-Π. Αγγλογάλλος, Θ. Σωτηριάδης, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός</i>	795
• ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΑΜΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΩΣ ΒΙΟΜΑΖΑ <i>Α.Ν. Δημητριάδης</i>	805
• ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΕΛΕΧΩΝ ΜΑΝΙΤΑΡΙΟΥ <i>AGARICUS BISPORUS</i> <i>Α. Κέφη, Γ. Ξανθόπουλος, Ε. Μανωλοπούλου και Γρ. Λαμπρινός</i>	815

- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ «ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΜΗΛΟΥ»
Delicious Pilafa
Ε. Μανωλοπούλου, Γρ. Λαμπρινός, Γ. Ξανθόπουλος, Ε. Χατζής και
Ε. Αραβαντινός–Καρλάτος..... 823
- ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
Στ. Ψυχογιού, Α. Κατσογιάννη, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος
Ε. Χατζής και Γρ. Λαμπρινός 831
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΝΩΠΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΨΥΞΗ
Στ. Ψυχογιού, Α. Κατσογιάννη, Ε. Μανωλοπούλου, Γ. Ξανθόπουλος και
Γρ. Λαμπρινός..... 841
- ΤΕΧΝΗΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΩΝ ΛΕΥΚΩΝ ΜΑΝΙΤΑΡΙΩΝ
AGARICUS BISPORUS ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ
Θ. Σωτηριάδης, Π–Ε Αγγλογάλλος, Γ. Ξανθόπουλος και Γρ. Λαμπρινός 849

Ευρετήριο Συγγραφέων **857**

Θεματικό Ευρετήριο **863**

6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο
της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος



**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΤΗ
ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΤΟΞΩΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Δ.Α. Κατέρης*, Ι.Ν. Ντάντος, Σ. Παπουτσή-Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,

Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

*E-mail: dkateris@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετάει την ασυμπίεστη, διδιάστατη, σταθερή, ιξώδη ροή αέρα πάνω από διπλό και τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Το υπολογιστικό πεδίο με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες προσομοιώνει τη ροή μέσα σε αεροσήραγγα. Οι εξισώσεις Navier–Stokes και συνέχειας αδιαστατοποιούνται ως προς την ομοιόμορφη ταχύτητα εισόδου της ροής και το ύψος των θερμοκηπίων. Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier–Stokes και συνέχειας γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σταθερής μάζας, (Galerkin method) με οριακές συνθήκες την ομοιόμορφη ταχύτητα ελεύθερης ροής στην αρχή του πεδίου ροής, τις συνθήκες μη ολισθήσεως στα όρια του πεδίου ροής και τις ελεύθερες οριακές συνθήκες στην έξοδο του πεδίου. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως προς το ύψος του εμποδίου και την ομοιόμορφη ταχύτητα εισόδου του πεδίου ροής. Οι αριθμοί Reynolds ποικίλουν από 0,02 μέχρι 1000 για το διπλό και το τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Τα αριθμητικά αποτελέσματα όπως οι γραμμές ροής, το μήκος αποκόλλησης και προσκόλλησης, οι συντελεστές πίεσης και διατμητικής τάσης του τοιχώματος παρουσιάζονται και συγκρίνονται ποιοτικά με διαθέσιμα αριθμητικά και πειραματικά δεδομένα για να ελεγχθεί η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων.

Λέξεις κλειδιά: πολλαπλά θερμοκήπια, εξισώσεις Navier–Stokes, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων Galerkin.

NUMERICAL SIMULATION OF A VISCOUS FLOW OVER MULTISPAN GREENHOUSES

D.L. Kateris*, J.N. Dados, S. Papoutsi–Psychoudaki and V.P. Fragos

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,

School of Agriculture, Aristotle University, 54124, Thessaloniki

*E-mail: dkateris@agro.auth.gr

ABSTRACT

The present work studies the incompressible two-dimensional, steady, viscous air flow over multispans greenhouses with two and three parabolic roofs. The computational domain with the boundary conditions simulates the flow in a wind tunnel. The N-S and continuity equations are solved numerically, using the Galerkin Finite Element Method, with boundary conditions the inlet velocity, the no-slip conditions at the walls and the free outlet conditions. The governing equations are non-dimensionalized by the inlet velocity and the height of the greenhouses. The Reynolds number, determined by the inlet velocity and the height of the greenhouses, is varied from 0.02 to 1000. The numerical results, such as streamlines, separation and reattachment length, pressure and wall shear stress coefficient are presented, and compared qualitatively with available numerical and experimental data to verify the precision of the numerical predictions.

Key words: multispans greenhouses, Navier–Stokes equations, Galerkin finite element method.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση του αέρα πάνω από μία κατασκευή, αστική ή γεωργική, πολλές φορές έχει καταστροφικά αποτελέσματα. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μελετώντας το φαινόμενο της ροής του αέρα πάνω από μια κατασκευή. Η προσέγγιση του φαινομένου βοηθάει τους επιστήμονες στην κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής, με αποτέλεσμα κατασκευαστικές λύσεις όπου παρουσιάζονται προβλήματα.

Λόγω της σπουδαιότητας του φαινομένου, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την διερεύνηση του, είτε πειραματικά είτε με αριθμητικές λύσεις. Το 1968 οι Acrivos et al., ασχολήθηκαν πειραματικά με την σταθερή ροή γύρω από εμπόδια διαφορετικής γεωμετρίας, σε κανάλι λαδιού, για μικρούς αριθμούς Reynolds. Υπέθεσαν ότι η ροή κατάντη του εμποδίου είναι ιξώδης και επηρεάζεται από τον τοπικό Re (ο Re είναι συνάρτηση του μήκους στροβιλισμού και της ταχύτητας πίσω απ' το εμπόδιο). Με πειραματικές μετρήσεις κατάντη καταβαθμού ασχολήθηκαν και οι Denham and Patric (1974) και οι Armaly et al. (1983), ενώ οι Ying-Jong et al. (1991) με ροή πάνω από στενά εμπόδια.

Με την αριθμητική προσομοίωση της ροής έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, λύνοντας τις εξισώσεις Navier–Stokes και συνέχειας, με διάφορες μεθόδους, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων και των πεπερασμένων στοιχείων. Με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ασχολήθηκαν οι Boum et al. (1999), σε διδιάστατη ροή γύρω από ορθογωνικό εδρασμένο εμπόδιο. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για σταθερή, διδιάστατη, ιξώδη, ασυμπίεστη ροή πάνω από καταβαθμό απασχόλησε τους Leone and Gresho (1981), τους Fragos et al. (1997), για ροή αέρα πάνω από ένα εδρασμένο εμπόδιο ορθογωνικού σχήματος και για ροή πάνω από παραβολικό εμπόδιο μέσα σε αεροσήραγγα τους Psychoudaki et al. (2005), καθώς και άλλους πολλούς ερευνητές.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις μαθηματικής προσομοίωσης διδιάστατης, σταθερής, ασυμπίεστης και ιξώδους ροής αέρα πάνω από α) διπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο και β) τριπλό. Το μαθηματικό μοντέλο για ιξώδη ρευστά (εξισώσεις Navier–Stokes και συνέχειας) επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, (Galerkin).

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΞΩΔΟΥΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

Οι εξισώσεις που περιγράφουν σταθερή, ασυμπίεστη, διδιάστατη ροή ιξώδους ρευστού πάνω από ένα εδρασμένο εμπόδιο παραβολικής οροφής, (που δεν επηρεάζεται από τη βαρύτητα ή άλλες εξωτερικές δυνάμεις) είναι οι εξής:

α) Εξισώσεις κίνησης (εξισώσεις N-S)

$$\left(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad (1)$$

β) Εξισώσεις διατήρησης της μάζας

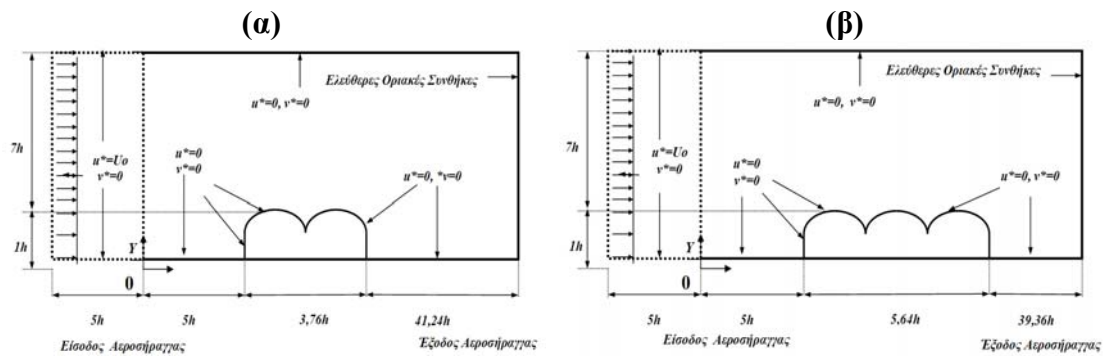
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

όπου $\vec{\nabla}$ = ανάδελα, $\vec{V}$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας σε m/s, p είναι η πίεση σε N/m², ν είναι το κινητικό ιξώδες σε m²/s και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα σε kg/m³.

Η αδιαστατοποίηση των μεταβλητών γίνεται με το ύψος του εμποδίου h , και με την ταχύτητα της ομοιόμορφης ροής U_0 . Ο αριθμός Reynolds ορίζεται, ομοίως από το ύψος h , και την ταχύτητα της ομοιόμορφης ροής στην είσοδο, $(Re)_h = U_0 h / \nu$.

Η περιοχή λύσης και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος παρουσιάζονται στα

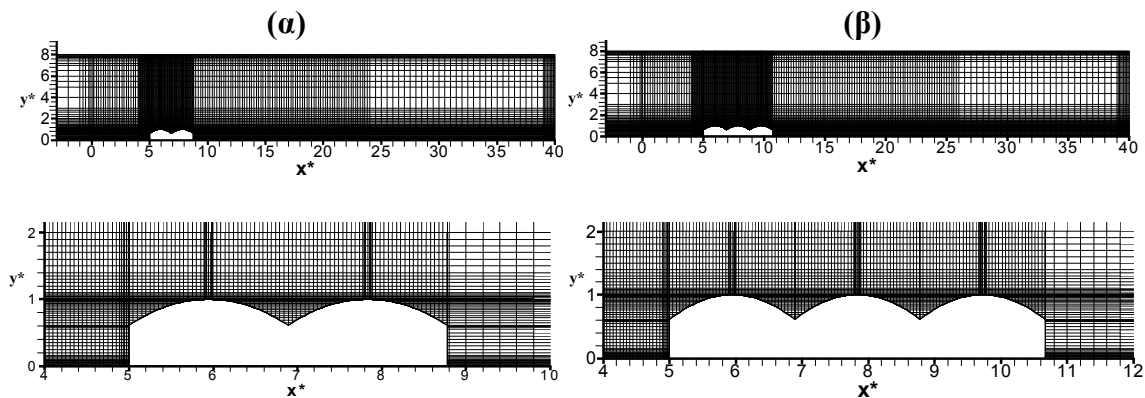
Σχήματα 1 α και β.



Σχήματα 1 α,β. Περιοχή υπολογιστικής λύσης και οριακές συνθήκες της διδιάστατης ροής πάνω από διπλό και τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο.

2.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι διαφορικές εξισώσεις 1 και 2 για διδιάστατη ροή, με τις οριακές συνθήκες που προαναφέρθηκαν, λύνονται με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η λύση περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση (discretization) της περιοχής λύσης σε τετράπλευρα και τριγωνικά στοιχεία, (Σχήματα 2 α,β).



Σχήματα 2 α,β. Υπολογιστικά πλέγματα και λεπτομέρειες των υπολογιστικών πεδίων, (α) Για το διπλό και (β) το τριπλό τοξωτό θερμοκήπιο.

Πιο συγκεκριμένα, τα γειτονικά στοιχεία γύρω από την παραβολική οροφή των θερμοκηπίων είναι τριγωνικά με καμπύλες πλευρές ενώ στην υπόλοιπη περιοχή λύσης χρησιμοποιούνται τετράπλευρα στοιχεία. Με την παραπάνω μέθοδο επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου ροής με το μικρότερο δυνατό σφάλμα.

Στον Πίνακα 1, δίνονται τα στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου ροής, και της μεθόδου επίλυσης. Ο προγράμματος και η επίλυση του αλγεβρικού προβλήματος που προκύπτει, έγινε σε γλώσσα VISUAL FORTRAN. Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζονται οι άγνωστες μεταβλητές u^* , v^* , p^* σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος, σε αδιάστατη μορφή.

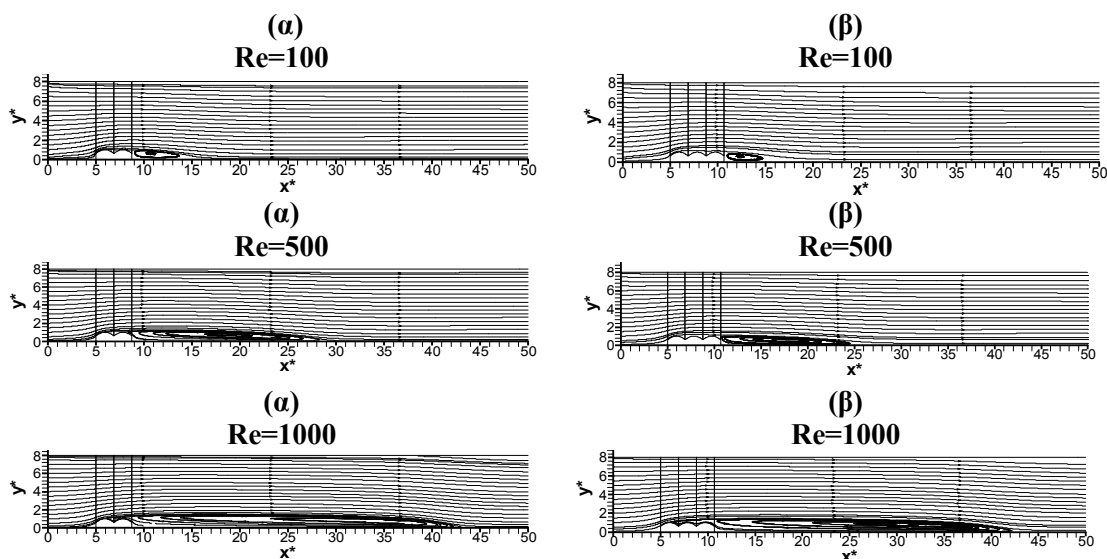
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα Σχήματα 3 α και β παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τρεις γραμμές ροής σε όλο το μήκος της περιοχής λύσης για επιλεγμένους αριθμούς Re (100, 500, 1000) για διπλό και τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Παρατηρείται ότι και στα δύο μοντέλα το μήκος της αναστροφής της ροής, που σχηματίζεται κατόντη από αυτά, αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Διαπιστώνεται ότι για τον ίδιο αριθμό $Re_{(h)}$, το μήκος

ανακυκλοφορίας στο τριπλό τοξωτό θερμοκήπιο είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του διπλού τοξωτού. Η διαπίστωση βρίσκεται σε συμφωνία με τους Antoniou and Bergeles, (1988).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά μεγέθη και στοιχεία της εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων στις περιπτώσεις (α) διπλού και (β) τριπλού τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου.

α/α	Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πεδίου	(α)	(β)
1.	Αδιάστατο ύψος υπολογιστικού πεδίου (H)	8	8
2.	Αδιάστατο μήκος υπολογιστικού πεδίου (L)	40	40
3.	Αδιάστατο πλάτος θερμοκηπίου (ℓ)	3,76	5,64
4.	Αδιάστατο ύψος θερμοκηπίου (h)	1	1
5.	Αδιάστατη θέση του θερμοκηπίου από την αρχή των αξόνων	5	5
6.	Διακύμανση αριθμών Reynolds	0,02-1370	0,02-1490
7.	Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων του υπολογιστικού πεδίου (NE)	20072	22144
8.	Πλήθος κόμβων του υπολογιστικού πεδίου (NH)	80863	89143
9.	Συνολικός αριθμός των αγνώστων του υπολογιστικού πεδίου (NP)	182134	200786
11.	Χρόνος για κάθε επανάληψη	4,185min	4,528min
12.	Κριτήριο σύγκλισης για την ταχύτητα	10^{-6}	10^{-6}
13.	Κριτήριο σύγκλισης για την πίεση	4×10^{-3}	4×10^{-3}
14.	Εύρος χωρικού βήματος τόσο κατά τον άξονα των x όσο και κατά τον άξονα των y	$0,002 \leq \Delta x \leq 0,5$ $0,01 \leq \Delta y \leq 1$	$0,002 \leq \Delta x \leq 0,5$ $0,01 \leq \Delta y \leq 1$



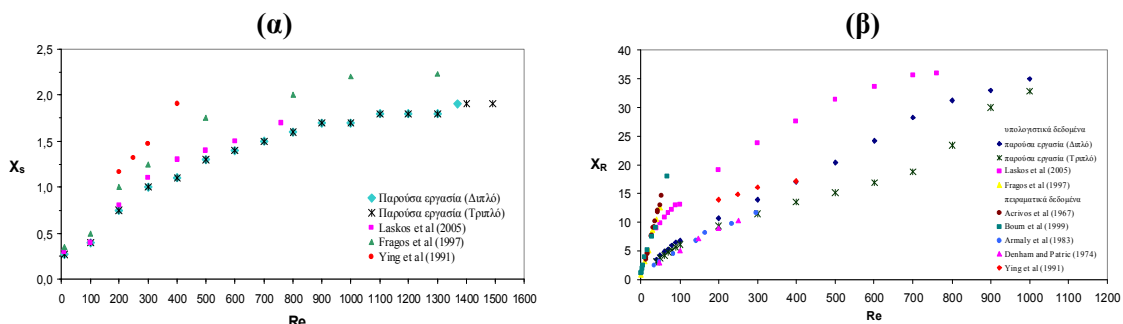
Σχήματα 3 α,β. Γραμμές ροής στην περιοχή λύσης της ροής, ανάντη και κατάντη των τοξωτών θερμοκηπίων, για Reynolds 100, 500, 1000.

Στο Σχήμα 4 α παρουσιάζονται τα μήκη αποκόλλησης x_s^* , ανάντη των εμποδίων της παρούσας εργασίας (θερμοκήπια) σε σύγκριση με το μήκος αποκόλλησης x_s^* των Fragos et al. (1997), Ying et al. (1991) και Psychoudaki et al. (2005 B). Παρατηρείται ότι το μήκος αποκόλλησης αυξάνεται με τον αριθμό Re, (σε αντίθεση με τους Pande

Pramod K. et al. (1980)), με διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης, που πιθανότατα οφείλονται στο διαφορετικό σχήμα των εμποδίων, (οι Fragos και Ying χρησιμοποίησαν ορθογωνικό εμπόδιο). Οι κατανομές του x^*_s στην παρούσα εργασία εμφανίζουν πλήρη ταύτιση των τιμών για το διπλό και το τριπλό θερμοκήπιο, ενώ παρατηρούνται ελάχιστα αυξημένες τιμές στην εργασία των Psychoudaki et al. (2005 A). Οι Hwang R. et al. (1999) διαπίστωσαν ότι το x^*_s δεν επηρεάζεται από το μήκος του εμποδίου. Η παρούσα εργασία διαπιστώνει ότι το μήκος x^*_s μάλλον επηρεάζεται από το σχήμα των κατασκευών και όχι από το πλάτος τους.

Οι Back and Roschke το 1972, μελετώντας τη ροή κατάντη απότομης διαστολής κυλινδρικού καναλιού, διαπίστωσαν ότι το μέγεθος του μήκους ανακυκλοφορίας ως προς τον αριθμό Re χαρακτηρίζει την μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Σε καθεστώς στρωτής ροής με μικρούς Re, το μήκος αυξάνεται απότομα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 β. Η σχέση μπορεί να είναι γραμμική για ορθογωνικό σχήμα εμποδίου και μικρούς αριθμούς $Re_{(h)}$, (Acrivos et al. (1968), Fragos et al. (1997), Boum et al. (1999)), ενώ για καταβαθμό και μεγάλο πλάτος κατασκευής (Denham and Patric, (1974), Armaly et al. (1983), τριπλό τοξωτό (παρούσα εργασία)) οι καμπύλες των κατανομών ταυτίζονται.

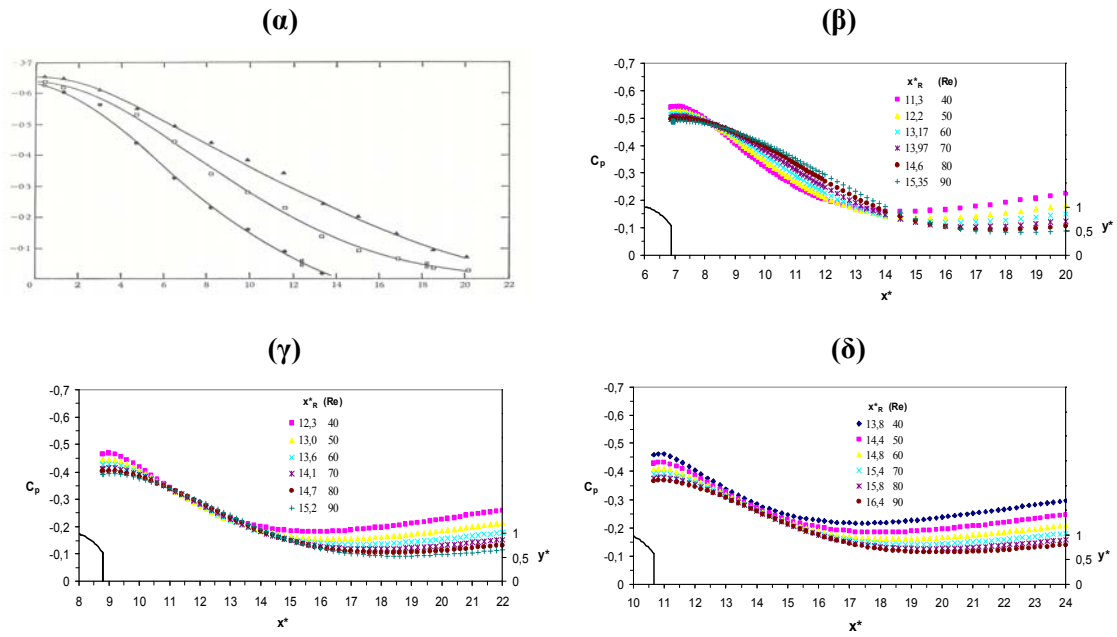
Παρατηρούμε επίσης, ότι το μήκος προσκόλλησης μειώνεται αυξανόμενου του πλάτους κατασκευής, (Λάσκος (2006), παρούσα εργασία). Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από τους Antoniou and Bergeles (1988).



Σχήματα 4 α,β. α) Μήκος αποκόλλησης ανάντη του εμποδίου β) Μήκος προσκόλλησης κατάντη του εμποδίου. Σύγκριση της παρούσας εργασίας με άλλες υπολογιστικές και πειραματικές εργασίες.

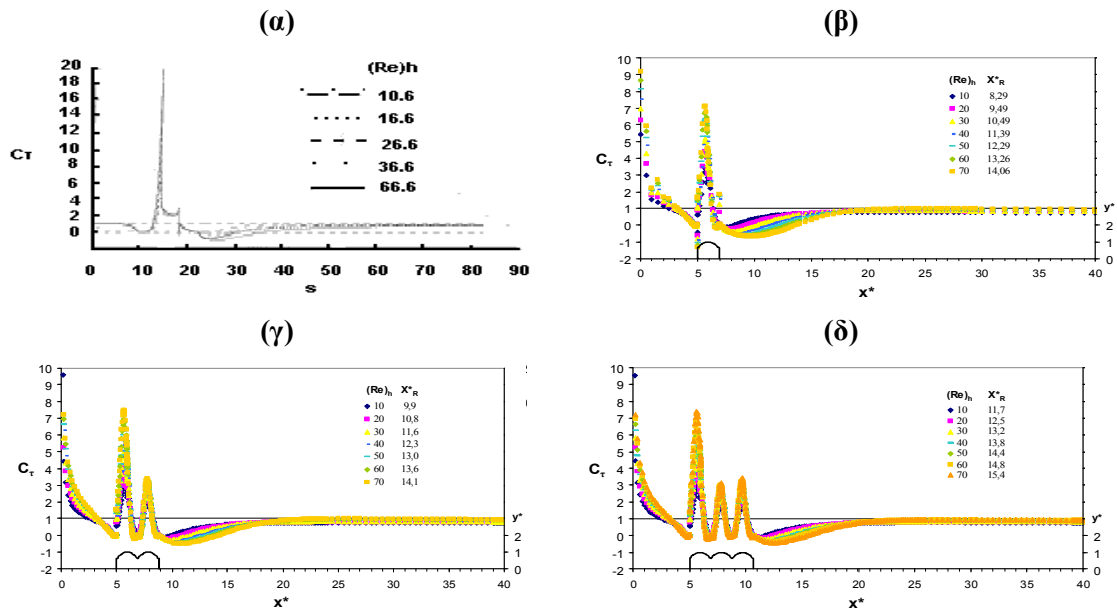
Ποιοτική σύγκριση του συντελεστή πίεσης C_p στον πυθμένα κατάντη εμποδίων, για μικρούς αριθμούς $Re_{(h)} < 100$, μεταξύ α) των πειραματικών αποτελεσμάτων των Acrivos et al. (1968), των αριθμητικώς υπολογισμένων τιμών β) της εργασίας του Λάσκου (2006) και της παρούσας εργασίας για γ) διπλό και δ) τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, απεικονίζεται στα Σχήματα 5 α έως δ. Η τιμή του C_p ορίζεται από τη σχέση $C_p = \frac{2\Delta p}{\rho U_0^2}$. Το εύρος των τιμών του συντελεστή πίεσης της παρούσας εργα-

σίας, αμέσως μετά το θερμοκήπιο είναι, $-0,46 \leq C_p \leq -0,38$ (διπλό) και $-0,45 \leq C_p \leq -0,36$ (τριπλό). Ενώ από την εργασία του Λάσκου (2006) είναι $-0,55 \leq C_p \leq -0,48$ και από την εργασία των Acrivos et al. (1968) είναι $-0,65 \leq C_p \leq -0,63$. Είναι εμφανές ότι το πλάτος του θερμοκηπίου επηρεάζει το εύρος των τιμών της πίεσης στο κατάντη άκρο του θερμοκηπίου. Το εύρος αυτό είναι μεγαλύτερο στο τριπλό θερμοκήπιο και μειώνεται όσο μικραίνει το πλάτος του θερμοκηπίου.



Σχήμα 5 α,β,γ,δ. Ποιοτική σύγκριση του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του πυθμένα κατάντη του εμποδίου, για $40 \leq Re \leq 90$ μεταξύ: (α) των πειραματικών δεδομένων των Acrivos et al. (1968), των υπολογισμένων τιμών (β) του Λάσκου (2006) και της παρούσας εργασίας για (γ) διπλό και (δ) τριπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, ($x_{(R)}^*$ η θέση προσκόλλησης).

Στα Σχήματα 6 α έως δ παρουσιάζεται ποιοτική σύγκριση των συντελεστών τριβής C_τ ($C_\tau = (Re)_h \cdot \frac{\tau_w}{\rho U_0^2} = \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + \frac{\partial u^*}{\partial y^*}$) κατά μήκος του πυθμένα της αεροσήραγγας, για μικρούς αριθμούς Reynolds από 10 έως 70.



Σχήματα 6 α,β,γ,δ. Ποιοτική σύγκριση του συντελεστή τριβής C_τ , (υπολογιστικά δεδομένα) κατά μήκος του πυθμένα για $10 \leq Re \leq 70$ μεταξύ: (α) των Boum et al. (1999), (β) του Λάσκου (2006) και της παρούσας εργασίας για (γ) διπλό και (δ) τριπλό τοξωτό θερμοκήπιο ($x_{(R)}^*$ η θέση προσκόλλησης).

Το Σχήμα 6 α δείχνει την κατανομή του συντελεστή τριβής των Ngo Boum et al. (1999), ενώ τα Σχήματα 6 β, γ, δ της κατανομής του Λάσκου (2006) και της παρούσας εργασίας για διπλό και τριπλό τοξωτό θερμοκήπιο.

Συγκρίνοντας τις τέσσερις κατανομές παρατηρείται ότι, εκτός από τις διαταραχές που προκαλούνται από τις οριακές συνθήκες στην είσοδο του τούνελ και τη διαφορά ως προς το μέγεθος της αιχμής του C_t (στην εργασία του Ngo Boum et al. 1999, η αιχμή έχει διπλάσιο ύψος από αυτά της εργασίας του Λάσκου και της παρούσας εργασίας), όλα τα σχήματα παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές, τέτοιες όπως μια απότομη θετική αιχμή στην κορυφή του εμποδίου-θερμοκηπίου, μια ήπια αρνητική αιχμή λίγο κατάντη από αυτό και αρκετά κατάντη της προσκόλλησης ο συντελεστής διατμητικής τάσης στο τοίχωμα παίρνει τιμή περίπου ίσης με τη μονάδα $C_t \approx 1$, και στις τέσσερις εργασίες.

Στα Σχήματα 6 γ, δ παρατηρούνται επίσης επιπλέον αιχμές θετικές και αρνητικές, λόγω της ύπαρξης της δεύτερης και της τρίτης παραβολικής οροφής, μικρότερου μεγέθους από αυτή που σχηματίζεται στην πρώτη οροφή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι γραμμές ροής έδειξαν δυο περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής, ανάντη και κατάντη των θερμοκηπίων. Το μήκος ανακυκλοφορίας κατάντη του τριπλού θερμοκηπίου είναι μικρότερο σε σχέση με το διπλό τοξωτό.

Συγκρίσεις του μήκους αποκόλλησης ανάντη των θερμοκηπίων, x_s^* , με τις εργασίες άλλων ερευνητών, έδειξαν ότι το μήκος αποκόλλησης αυξάνεται με τον αριθμό Re , με διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης, που οφείλεται μάλλον στο διαφορετικό σχήμα των εμποδίων-κατασκευών. Στην παρούσα εργασία, οι κατανομές του μήκους αποκόλλησης x_s^* ταυτίζονται πλήρως τόσο για το διπλό όσο και για το τριπλό θερμοκήπιο, ενώ οι τιμές του x_s^* των άλλων ερευνητών είναι λίγο αυξημένες.

Σύγκριση του μήκους πρόσκρουσης x_R κατάντη των θερμοκηπίων της παρούσας εργασίας με τις εργασίες άλλων ερευνητών με διαφορετικό σχήμα εμποδίου – κατασκευής επιβεβαιώνει ότι αυξανόμενου του αριθμού $Re_{(h)}$ αυξάνεται το μήκος x_R . Το μήκος x_R μειώνεται όταν αυξάνει το πλάτος της κατασκευής (απλό, διπλό, τριπλό θερμοκήπιο).

Όσον αφορά τον συντελεστή πίεσης, σε ποιοτική σύγκριση με άλλους ερευνητές και για $Re < 100$, φαίνεται ότι το σχήμα της κατασκευής επηρεάζει την τιμή του συντελεστή πίεσης. Για τον ίδιο αριθμό $Re_{(h)}$, αυξανόμενου του πλάτους της κατασκευής αυξάνει και ο συντελεστής C_p . Ο συντελεστής πίεσης αυξάνει έως το σημείο προσκόλλησης και κατάντη αυτού μειώνεται αυξανόμενου του αριθμού $Re_{(h)}$.

Ποιοτική σύγκριση του συντελεστή τριβής του τοιχώματος C_t της παρούσας εργασίας με αντίστοιχες άλλων ερευνητών έδειξαν πολύ καλή ομοιότητα, όπως έντονη μέγιστη τιμή στην οροφή της κατασκευής (μειούμενη στις κατασκευές με πολλαπλά τόξα). Άξιο παρατήρησης είναι η τάση προς την τιμή $C_t=1$ αρκετά κατάντη από τις κατασκευές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acrivos, A., Snowden, D.D., Grove, A.S. and Peterson, E.E., 1965. *The steady separated flow past a circular cylinder at large Reynolds numbers*. Journal of Fluid Mechanics, 21 (4): 737-760.
- Acrivos, A., Leal, L.G., Snowden, D.D. and Pan, F., 1968. *Further experiments on steady separated flows past bluff objects*. Journal of Fluid Mechanics, 34 (1): 25-48.
- Antonioni, J. and Bergeles, G., 1988. *Development of the Reattached Flow Behind Surface-Mounted Two-Dimensional Prisms*. Journal of Fluids Engineering, 110: 127-133.

- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. and Schonung, B., 1983. *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow*. Journal of fluid Mechanics, 127: 473-496.
- Back, L.H. and Roschke, E.J., 1972. *Shear-Layer Flow Regimes and Wave Instabilities and Reattachment Lengths Downstream of an Abrupt Circular Channel Expansion*. Journal of Applied Mechanics.
- Boum Ngo, G.B., Martemianov, S. and Alemany, A., 1999. *Computational study of laminar flow and mass transfer around a surface-mounted obstacle*. International Journal of heat and mass transfer, 42: 2849-2861.
- Denham, M.K. and Patrick, M.A., 1974. *Laminar Flow over a Downstream-facing Step in a Two-Dimensional Flow Channel*. Chemical Engineering Research and Design, 52 : 361.
- Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A., 1997. *Computer-aided analysis of flow past a surface-mounted obstacle*. International Journal for numerical methods in fluids, 25: 495-512.
- Hwang Robert, R., Chow, Y.C. and Peng, Y.F., 1999. *Numerical study of turbulent flow over two-dimensional surface-mounted ribs in a channel*. International Journal for numerical methods in fluids, 31: 767-785.
- Λάσκος, B.N., 2006. *Μαθηματική προσομοίωση ροής αέρα πάνω από τοξωτό θερμοκήπιο*. Διπλωματική μεταπτυχιακή διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 283 σελ.
- Leone, John M. and Gresho, Philip M., 1981. *Finite element simulations of steady, two dimensional, viscous incompressible flow over a step*. Journal of computational physics, 41: 167 – 191.
- Pande Pramod, K., Prakash, Rasendra and Agarwal Manharan, L., 1980. *Flow past fence in turbulent boundary layer*. Journal of the hydraulics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 106, No: HY1.
- Psychoudaki, S.P., Laskos, V.N., Fragos, V.P., 2005A. *A Two-dimension Computational Investigation of the Flow over a Wall-mounted Parabolic Body*. 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. On Fluid Mechanics and Aerodynamics, Corfu Island, Greece, August 20-22.
- Psychoudakim, S.P., Laskos, V.N., Fragos, V.P., 2005B. *Numerical Analysis of Viscous Flow over a mounted Parabolic Body*. IASME Transactions, Issue 7, 2: 1207-1216.
- Ying-Jong, Hong, Shou-Shing, Hsieh and Huei-Jan, Shih, 1991. *Numerical computation of laminar separation and reattachment of flow over surface mounted ribs*. Journal of fluids Engineering, 113: 190-198.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΣΤΡΥΜΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ (H-ADCP)

Σ. Βουγιούκας^{1*}, Δ. Παπαμιχαήλ¹, Π. Γεωργίου¹ και Δ. Παπαδήμος²

¹Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,
Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη

²Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας – Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων
(Ε.Κ.Β.Υ.), 14^ο χλμ. οδού Θεσσαλονίκης – Μηχανιώνας, 57001 Θέρμη

*E-mail: bougis@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της παροχής νερού στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα. Το οριζόντιο προφίλ της ταχύτητας νερού μεταβάλλεται κατά μήκος της διατομής. Επίσης, και το κάθετο προφίλ της ταχύτητας είναι ακανόνιστο και χρονικά μεταβαλλόμενο. Η μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας γίνεται με τη χρήση ενός ακουστικού αυτογραφικού ρευματογράφου οριζόντιας δέσμης (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler) (H-ADCP) ο οποίος μετακινείται καθ' ύψος με ένα μηχανικό σύστημα. Για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του οργάνου (H-ADCP) έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας του νερού με μυλίσκο σε διάφορα βάθη οι οποίες έδειξαν πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις του οργάνου όταν το σημείο μέτρησης βρίσκεται μεταξύ 5 και 35 μέτρα από τον αισθητήρα (τουλάχιστον 5 μέτρα μακριά από κάθε όχθη).

Λέξεις κλειδιά: ταχύτητα νερού, υπέρηχοι, Ντόπλερ, μηχανική.

DISCHARGE MEASUREMENT IN STRYMONAS ESTUARY WITH A HORIZONTAL ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER (H-ADCP)

S. Vougioukas^{1*}, D. Papamichail¹, P. Georgiou¹ and D. Papadimos²

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

²The Goulandris Natural History Museum, Greek Biotope/Wetland Centre,
14th km Thessaloniki-Mihaniona, 57001 Thermi, Greece

*E-mail: bougis@agro.auth.gr

ABSTRACT

This paper presents an innovative real-time discharge measurement system which was installed at the Strymonas estuary. The water velocity profiles vary significantly along the cross section and the vertical velocity profile at a given position is irregular and time-varying. The developed system uses a horizontal acoustic Doppler current profiler (H-ADCP) attached to a mechatronic system which moves vertically the H-ADCP to different distances from the soil surface. The comparison between the H-ADCP and current-meter measurements at various depths was very good at distances between 5 and 35 meters from the H-ADCP sensor head (at least 5m away from each river side).

Key words: water velocity, ultrasound, Doppler, mechatronics.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριος σκοπός των υδρομετρήσεων είναι ο υπολογισμός της παροχής των υδάτινων ρευμάτων. Βασική προϋπόθεση για τη σωστή εκτίμηση της παροχής είναι η γνώση της κατανομής της ταχύτητας. Η κατανομή αυτή βρίσκεται με τη βοήθεια πραγματικών μετρήσεων της ταχύτητας, που γίνονται σε αρκετά σημεία της διατομής με την κλασική συσκευή του μυλίσκου (Παπαμιχαήλ, 2004). Η απαίτηση όμως για συχνές και ακριβείς μετρήσεις ταχύτητας ροής οδήγησε στο σχεδιασμό και την κατασκευή νέων αισθητήρων, όπως είναι οι ηλεκτρομαγνητικοί, οι ηλεκτροπτικοί, τα όργανα μέτρησης ταχύτητας με χρήση Laser, οι ακουστικοί μετρητές ταχύτητας και οι ακουστικοί αυτογραφικοί ρευματογράφοι (Rantz et al., 1982; USDI, 1997; Μπάρμπας, 2006).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της παροχής νερού στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα πλησίον του οικίσκου «Αντλιοστάσιο Εμπλουτισμού, Δήμος Ορφανού» (γεωγραφικό μήκος: 484983, γεωγραφικό πλάτος: 4518336 σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ). Στη συγκεκριμένη θέση μέτρησης το οριζόντιο προφίλ της ταχύτητας νερού μεταβάλλεται κατά μήκος της διατομής. Επίσης το κάθετο προφίλ της ταχύτητας είναι ακανόνιστο και χρονικά μεταβαλλόμενο (Vougioukas et al., 2008). Η μέτρηση της ταχύτητας σε διάφορες θέσεις γίνεται με τη χρήση ενός ακουστικού αυτογραφικού ρευματογράφου οριζόντιας δέσμης (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler) (H-ADCP) ο οποίος μπορεί να κινηθεί αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση σε διαφορετικά ύψη (άξονας Y), ώστε να δημιουργεί έναν πίνακα-πλέγμα μετρήσεων ταχύτητας. Οι μετρήσεις ταχύτητας μπορούν να παίρνονται αυτόματα, σε καθημερινή βάση, ή όσο συχνά επιτρέπουν οι περιορισμοί στη διαθέσιμη ενέργεια του συστήματος. Κατάλληλο λογισμικό χρησιμοποιεί τις μετρήσεις σε όλα τα δυνατά βάθη προκειμένου να υπολογίσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική παροχή νερού. Επιπλέον, η μέτρηση του βάθους ροής γίνεται με αυτόματη επιφανειακή σάρωση του ποταμού με υπερηχητικό βυθόμετρο.

Το σύστημα είναι καινοτόμο, διότι αφενός το H-ADCP δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποθενά αλλού με κάθετη σάρωση, αφετέρου συνδυάζει τεχνολογίες αιχμής στους τομείς της μέτρησης της χωρικής κατανομής της ταχύτητας του νερού και του βάθους νερού εντός ποταμού, της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων, της μηχανικής κίνησης, των τηλεπικοινωνιών και τηλε-ελέγχου, καθώς και τεχνολογία λογισμικού πραγματικού χρόνου. Για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του οργάνου (H-ADCP) έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας του νερού με μύλις σε διάφορα βάθη οι οποίες έδειξαν πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις του οργάνου.

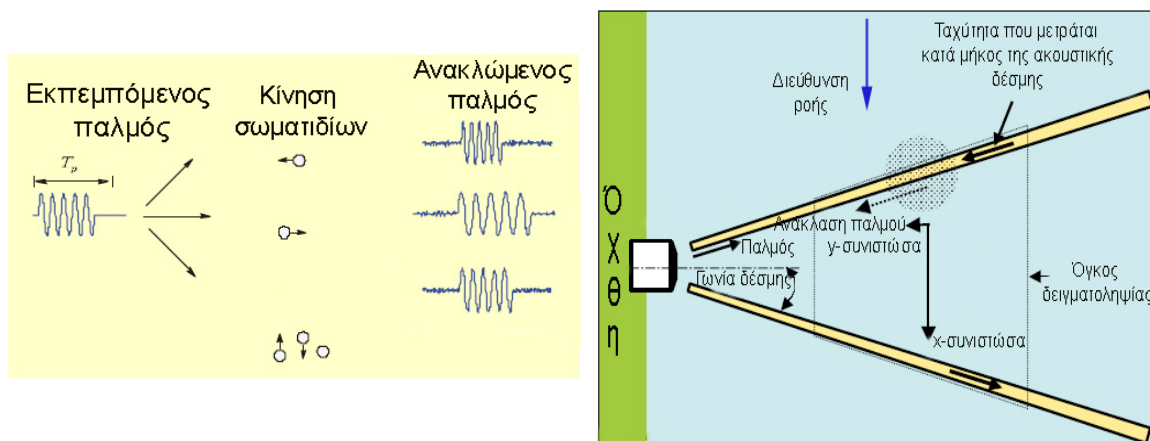
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΓΡΑΦΩΝ

Η ταχύτητα ροής σε ένα υδατόρρευμα μεταβάλλεται με το βάθος και την απόσταση από την όχθη. Για τον υπολογισμό της παροχής με την εξίσωση συνέχειας πρέπει να είναι γνωστή η μέση ταχύτητα ροής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από μία ή περισσότερες μετρήσεις σημειακής ταχύτητας, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της, όπως επίσης και από το βάθος ροής. Για τη σημειακή μέτρηση της ταχύτητας ροής χρησιμοποιούνται αισθητήρες που μετρούν τη συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της ροής ή το διάνυσμα της ταχύτητας σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Η μέτρηση γίνεται με τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα στο νερό, στο επιθυμητό σημείο. Τέτοιοι αισθητήρες μπορεί να είναι μηχανικοί (μύλίσκοι), ηλεκτρομαγνητικοί, ηλεκτροπτικοί, υδροακουστικοί και οπτικοί.

Πέραν όμως της σημειακής μέτρησης της ταχύτητας ροής υπάρχουν υπερηχητικοί αισθητήρες οι οποίοι μετρούν την ταχύτητα ροής νερού σε περισσότερα του ενός σημεία ταυτόχρονα. Η λειτουργία των αισθητήρων αυτών στηρίζεται στην αρχή ότι ένας υπερηχητικός μετατροπέας (transducer) ο οποίος βρίσκεται μέσα στο νερό παράγει ένα

σύντομο παλμό γνωστής συχνότητας ο οποίος διαδίδεται κατά μήκος της ακουστικής δέσμης. Ο εξερχόμενος παλμός ανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις από τα σωματίδια που αιωρούνται στο νερό. Ένα μέρος από την ανακλώμενη ενέργεια επιστρέφει πίσω –κατά μήκος της δέσμης διάδοσης του παλμού– στον μετατροπέα. Το επιστρέφον σήμα έχει υποστεί μετατόπιση συχνότητας ανάλογη της ταχύτητας των σωματιδίων που προκαλούν την ανάκλαση. Αυτή η αλλαγή συχνότητας (μετατόπιση Doppler), όπως μετριέται, είναι ανάλογη προς την προβολή της ταχύτητας του νερού επάνω στον άξονα διάδοσης της ακουστικής δέσμης (Σχήμα 1α). Επιπλέον της μεταβολής συχνότητας μετριέται και ο χρόνος που «ταξιδεύει» το σήμα. Για σημειακή μέτρηση σε επιθυμητή απόσταση το σύστημα επεξεργάζεται μόνον το σήμα που επιστρέφει συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση αυτή. Φυσικά ο όρος «σημειακή» είναι καταχρηστικός, μια και αυτό που επιστρέφει ο αισθητήρας είναι η μέση ταχύτητα ενός μικρού όγκου νερού (κελιού).

Εάν γίνει επεξεργασία των επιστρεφόμενων σημάτων εντός ενός χρονικού παραθύρου είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατανομής (προφίλ) της ταχύτητας κατά μήκος της διαδρομής του σήματος (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP). Προκειμένου να μετρηθεί η συνιστώσα της ταχύτητας του νερού κάθετα στη δέσμη χρησιμοποιούνται στην πράξη 2 δέσμες υπό (μικρή) γωνία μεταξύ τους. Ανάλογα με τον αριθμό υπερηχητικών δεσμών που χρησιμοποιούνται είναι δυνατός ο υπολογισμός του τρισδιάστατου διανύσματος ταχύτητας (3 δέσμες) ή διδιάστατου (2 δέσμες).

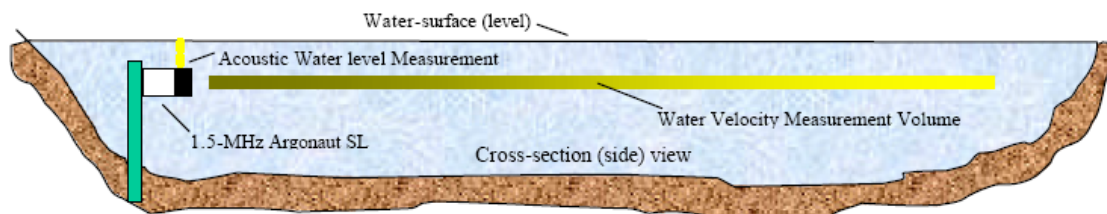


Σχήμα 1α. Φαινόμενο Doppler, β. Μέτρηση με δύο δέσμες (Μπάρμπας, 2006)

Τυπικές συχνότητες σήματος είναι από 300 έως 1200 KHz, ενώ το σφάλμα είναι της τάξης του $\pm 0,5\%$. Είναι δυνατή η μέτρηση ταχυτήτων από 0 έως ± 6 m/s με διακριτική ανάλυση μέτρησης (resolution) 0,1 cm/s. Η ελάχιστη και μέγιστη απόσταση μέτρησης εξαρτάται από το μήκος κύματος της δέσμης και κυμαίνεται από 1 m για την ελάχιστη (υψηλής συχνότητας αισθητήρας) έως και 300 m για τη μέγιστη (χαμηλής συχνότητας αισθητήρας).

Οι ακουστικοί αυτογραφικοί ρευματογράφοι (ADCP) είναι κάθετης και οριζόντιας δέσμης. Στους αισθητήρες κάθετης δέσμης η μέτρηση γίνεται από σκάφος επιφανείας και μετριέται η κατανομή ταχύτητας από την επιφάνεια έως τον πυθμένα. Στους αισθητήρες οριζόντιας δέσμης, ο αισθητήρας τοποθετείται μόνιμα στα πλάγια της κοίτης και με 2 δέσμες μετράει την οριζόντια κατανομή ταχύτητας σε συγκεκριμένο βάθος. Στην πραγματικότητα κάθε δέσμη μετράει τη συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της δέσμης. Επειδή όμως οι δέσμες είναι υπό γωνία είναι δυνατός ο υπολογισμός της διδιάστατης ταχύτητας. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η οριζόντια δέσμη που εκπέμπει ο αισθητήρας. Στην πραγματικότητα η δέσμη είναι ένας στερεός κώνος με πολύ μικρό άνοιγμα γωνίας (τυπικές τιμές 1-3 μοίρες).

Ακόμη και η μικρή αυτή γωνία έχει σαν αποτέλεσμα τα κελιά που βρίσκονται μακριά από την κεφαλή εκπομπής να είναι μεγαλύτερα από αυτά που βρίσκονται κοντά της. Για παράδειγμα, με γωνία κώνου 1,5 μοίρες, στα 40 μέτρα απόσταση το αντίστοιχο κελί έχει ύψος 1 μέτρο και η ταχύτητα που μετρά ο αισθητήρας είναι η μέση ταχύτητα του κελιού.



Σχήμα 2. Ακουστικός αυτογραφικός ρευματογράφος οριζόντιας δέσμης (H-ADCP)

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από τρία (3) επιμέρους υπο-συστήματα: Α) Ένα μόνιμα τοποθετημένο - υποβρύχιο - μηχανικό σύστημα μέτρησης της κατανομής ταχύτητας και της στάθμης του νερού σε μία διατομή του ποταμού σε μία συγκεκριμένη θέση, Β) Ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης του βάθους του ποταμού σε ολόκληρη τη διατομή του, στην ίδια θέση μέτρησης με το σύστημα Α και Γ) Ένα σύστημα υπολογισμού της παροχής του ποταμού βασισμένο στις μετρήσεις από τα συστήματα Α και Β.

3.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗΣ

Το σύστημα βασίζεται στη χρήση του αισθητήρα υπερήχων Channel-Master™ H-ADCP της εταιρίας Teledyne RD Instruments (Σχήμα 3). Ο αισθητήρας λειτουργεί στα 600 kHz. Ο αισθητήρας βρίσκεται τοποθετημένος σε ένα κατακόρυφο έμβολο (Σχήμα 4), μόνιμως κάτω από την επιφάνεια του νερού και μπορεί να κινηθεί σε διαφορετικά βάθη μέσω ενός συστήματος κίνησης ελεγχόμενου από έναν μικροϋπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό. Οι μετρήσεις ταχύτητας και στάθμης λαμβάνονται αυτόματα τουλάχιστον μία φορά ημερησίως (ή πιο συχνά εάν είναι επιθυμητό και εφόσον υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια), ενώ υπάρχει η δυνατότητα κατά βούληση κινήσεων και μετρήσεων είτε από τοπικό χειριστή, ή μέσω τηλε-ελέγχου (εφόσον υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια). Οι μετρήσεις μεταδίδονται στον Η/Υ του συστήματος υπολογισμού παροχής μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της κίνησης, μετάδοσης των μετρήσεων και διαχείρισης της ενέργειας είναι ασφαλώς τοποθετημένο σε ειδικών προδιαγραφών κιβώτιο. Η ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος παρέχεται από ένα ηλιακό πάνελ κατάλληλης ισχύος (Σχήμα 5) το οποίο έχει τοποθετηθεί στην οροφή του κιβωτίου με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι ορατό και εύκολα προσπελάσιμο. Σε περίπτωση όπου το ποτάμι είναι παγωμένο, η οποιαδήποτε κίνηση του αισθητήρα ακυρώνεται αυτόματα από το σύστημα για λόγους ασφάλειας.



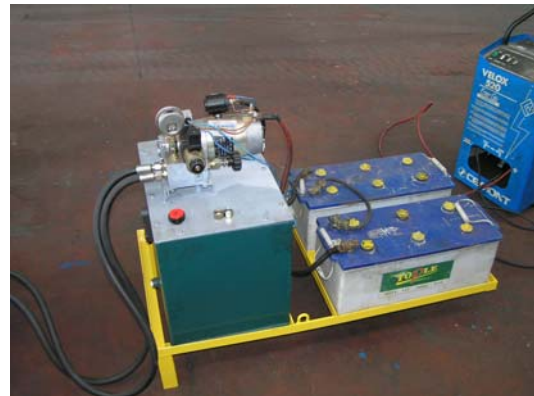
Σχήμα 3. Αισθητήρας H-ADCP



Σχήμα 4. Έμβολο μετακίνησης αισθητήρα



Σχήμα 5. Ηλιακό πάνελ για την εξασφάλιση ενέργειας λειτουργίας συστήματος



Σχήμα 6. Αντλία λαδιού για την κίνηση της δοκού και οι μπαταρίες

3.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Το σύστημα βυθομέτρησης σε ολόκληρη τη διατομή του ποταμού βασίζεται στη μηχανική επιφανειακή σάρωση ολόκληρου του πλάτους του ποταμού από ένα βυθόμετρο και στην αυτόματη καταγραφή του βάθους σε συγκεκριμένα σημεία δειγματοληψίας. Ο βυθομετρικός αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε μία μικρή ελαφριά πλωτή κατασκευή («σκάφος») το οποίο είναι αναρτημένο από ένα συρματόσχοινο το οποίο διατρέχει το ποτάμι κατά πλάτος, στο συγκεκριμένο σημείο μέτρησης. Η κίνηση παράγεται μέσω τροχαλίας η οποία κινεί το συρματόσχοινο, στο οποίο είναι κρεμασμένο το σκάφος. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε φορητό σύστημα ψηφιακής καταγραφής το οποίο μπορεί να συνδεθεί μέσω σειριακής θύρας επικοινωνίας με το σύστημα υπολογισμού παροχής προκειμένου να μεταφερθούν οι μετρήσεις στο σύστημα αυτό. Το σύστημα βυθομέτρησης είναι εγκατεστημένο μόνιμα στο ποτάμι. Για λόγους ασφάλειας όμως, ο αισθητήρας βυθομέτρησης και το καταγραφικό είναι μεταφερόμενα, σε κατάλληλη συσκευασία. Η βυθομέτρηση απαιτεί έναν χειριστή, ο οποίος συνδέει το σκάφος στο συρματόσχοινο και ξεκινά την αυτόματη διαδικασία.

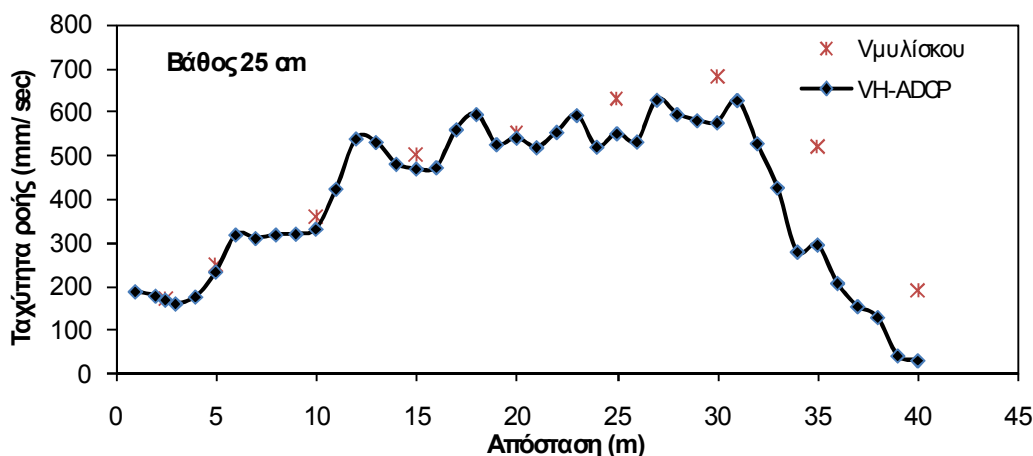
3.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ

Το σύστημα υπολογισμού παροχής αποτελείται από έναν Η/Υ εφοδιασμένο με ένα ασύρματο μόντεμ (GSM) και κατάλληλο λογισμικό επικοινωνίας, επεξεργασίας και αρχειοθέτησης δεδομένων, το οποίο εκτελείται σε παραθυρικό περιβάλλον. Ο Η/Υ λαμβάνει καθημερινά τα δεδομένα ταχύτητας αυτόματα μέσω του δικτύου GSM από το σύστημα μέτρησης ταχύτητας. Επίσης, λαμβάνει από το καταγραφικό του συστήματος βυθομέτρησης το προφίλ βάθους του ποταμού στη συγκεκριμένη θέση μέτρησης των ταχυτήτων, κάθε φορά που νέες μετρήσεις είναι διαθέσιμες. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί τα δεδομένα βάθους και ταχυτήτων προκειμένου να υπολογίσει την παροχή νερού του ποταμού με τη βοήθεια της εξίσωσης συνέχειας. Το λογισμικό χρησιμοποιεί το ίδιο προφίλ βάθους, μέχρι να του δοθεί ένα καινούργιο προφίλ. Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων (SQL server) με πρόσβαση από το Διαδίκτυο για περαιτέρω χρήση και ανάλυση.

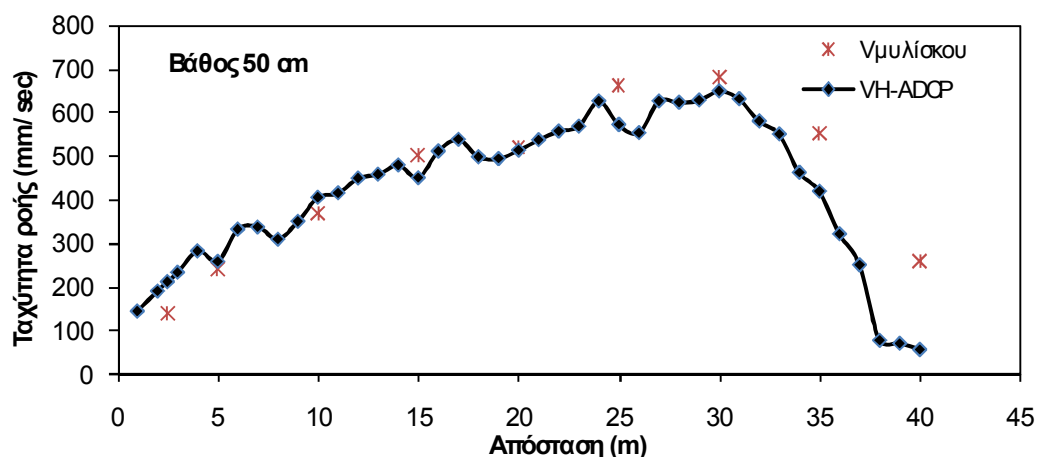
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Βασικός στόχος των πειραμάτων που έγιναν ήταν η σύγκριση των μετρήσεων ταχύτητας μυλίσκου και ρευματογράφου. Στη διατομή όπου εγκαταστάθηκε το σύστημα έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας ροής σε διάφορες αποστάσεις και σε διάφορα βάθη με τον ακουστικό ρευματογράφο και με έναν κλασσικό μυλίσκο (τύπος OSS-B1 No. 86-27) μέσα από βάρκα. Οι μετρήσεις με το μυλίσκο έγιναν σε αποστάσεις ανά 5 m από την αρχή ενώ τα βάθη στα οποία έγιναν μετρήσεις ήταν από την επιφάνεια του νερού μέχρι τον πυθμένα με βήμα βάθους 25 cm. Στα Σχήματα 7, 8, 9 και 10 φαίνονται οι μετρήσεις της ταχύτητας ροής που έγιναν τόσο με μυλίσκο όσο και με το H-ADCP, σε βάθη 25 cm, 50 cm, 75 cm και 100 cm σε διάφορες αποστάσεις για τις 23 Οκτωβρίου 2006.

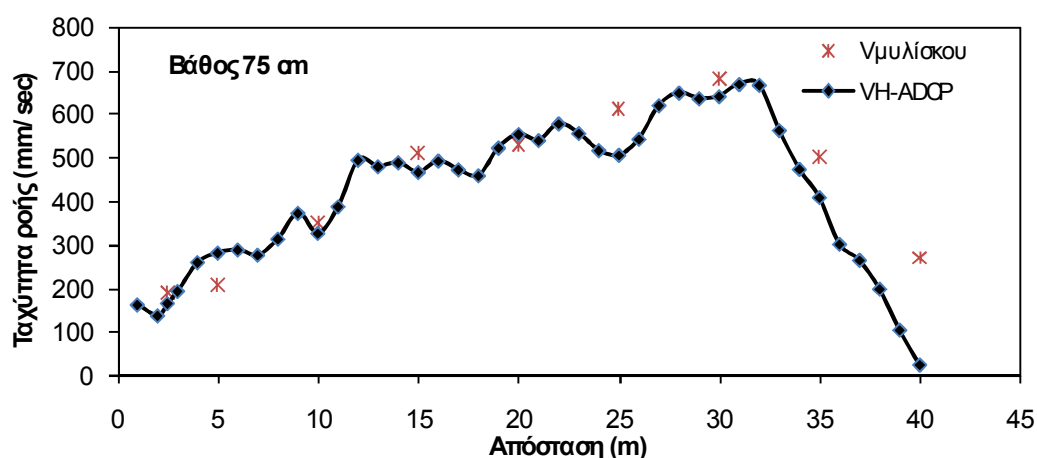
Όπως φαίνεται από τα σχήματα οι μετρήσεις έδειξαν πολύ καλή συμφωνία μεταξύ H-ADCP και μυλίσκου σε όλα τα βάθη γεγονός που επιβεβαίωσε την καλή λειτουργία του οργάνου και την δυνατότητα χρησιμοποίησής του για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής και τον υπολογισμό της παροχής σε συνάρτηση και με τη μέτρηση του βάθους ροής. Συγκεκριμένα, για απόσταση από την όχθη μεταξύ 5 και 35 μέτρων η μέγιστη απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων ήταν 15,4%. Σε αποστάσεις μικρότερες των 5 και μεγαλύτερες των 35 μέτρων η διαφορά έφτανε και το 80%. Οι αποκλίσεις οφείλονται κυρίως σε φαινόμενα ανάκλασης της δέσμης στις όχθες ή στην επιφάνεια του νερού στην περίπτωση των μακρινών μετρήσεων λόγω ανοίγματος του κώνου της υπερηχητικής δέσμης.



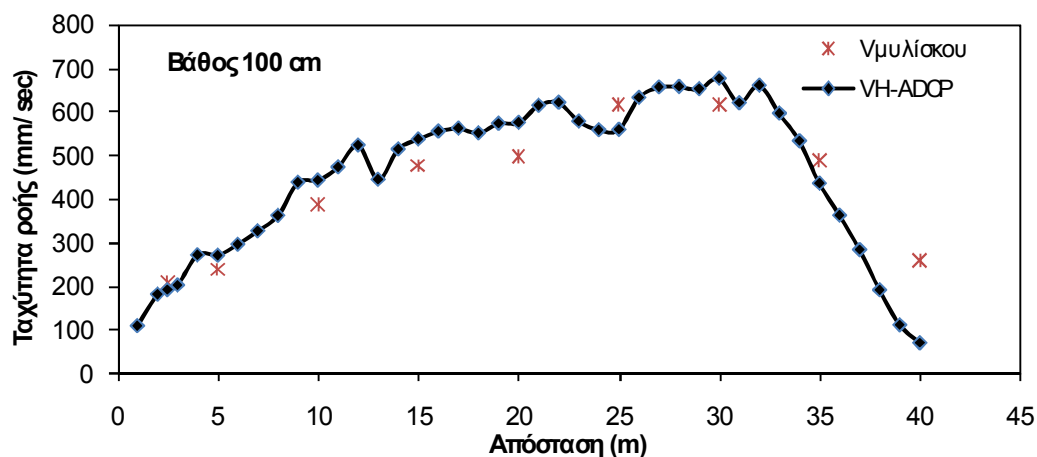
Σχήμα 7. Μετρήσεις ταχύτητας ροής στις εκβολές του Στρυμόνα σε βάθος 25 cm στις 23/10/2006.



Σχήμα 8. Μετρήσεις ταχύτητας ροής στις εκβολές του Στρυμόνα σε βάθος 50 cm στις 23/10/2006.



Σχήμα 9. Μετρήσεις ταχύτητας ροής στις εκβολές του Στρυμόνα σε βάθος 75 cm στις 23/10/2006.



Σχήμα 10. Μετρήσεις ταχύτητας ροής στις εκβολές του Στρυμόνα σε βάθος 100 cm στις 23/10/2006.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της παροχής νερού στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα. Η μέτρηση της ταχύτητας γίνεται με τη χρήση ενός ακουστικού αυτογραφικού ρευματογράφου οριζόντιας δέσμης (Horizontal

Acoustic Doppler Current Profiler) (H-ADCP) και η μέτρηση του βάθους ροής γίνεται με αυτόματη επιφανειακή σάρωση του ποταμού με υπερηχητικό βυθόμετρο.

Για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του οργάνου (H-ADCP) έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας του νερού με μολίσκο οι οποίες έδειξαν πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους όταν το σημείο μέτρησης δεν είναι πολύ κοντά στην όχθη (μικρότερη από 5 μέτρα) ή πολύ μακριά από τον αισθητήρα (μεγαλύτερη από 35 μέτρα).

Ευχαριστίες

Η έρευνα και ανάπτυξη του συστήματος χρηματοδοτήθηκε από το Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας μέσω του Ελληνικού Κέντρου Βιοτόπων – Υγροτόπων (ΜΓΦΙ - ΕΚΒΥ) στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος LIFE. Περισσότερες πληροφορίες για το έργο υπάρχουν στην τελική αναφορά (Χαλκίδης, Η. και Παπαδήμος, Δ., 2007).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μπάρμπας, Α., 2006. *Ανάλυση Λειτουργίας Ακουστικών Ρευματογράφων για τη Μέτρηση Ταχύτητας Ροής σε Υδατορεύματα*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Π.Μ.Σ. Γεωπονικής Σχολής Α.Π.Θ.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., 2004. *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη. Θεσσαλονίκη, 394 σελ.
- Rantz S. et al., 1982. *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. Geological survey water-supply paper 2175, USGS. United States Government Printing Office. Washington, pp 284.
- RDI, 2004. *Channel Master Horizontal ADCP Operational Manual*. RDI Instruments Acoustic Doppler Solutions.
- United States Department of the Interior, 1997. *Water Measurement Manual – A Water Resources Technical Publication*. U.S.D.I. Bureau of Reclamation.
- Vougioukas, S., Papamichail, D., Georgiou, P., Chalkidis, I., Papadimos, D., 2008. *Discharge Measurement via Depth Scanning with A Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler*. CD Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering 2008, Paper No. 1145704. Hersonissos, Crete – Greece.
- Χαλκίδης, Η. και Παπαδήμος, Δ. (Συντονιστές Έκδοσης), 2007. *Τεχνική Έκδοση Έργου LIFE-Περιβάλλον: Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στη Λεκάνη του Στρυμόνα για τη Μείωση των Επιπτώσεων από τη Γεωργία με τη Χρήση Σύγχρονων Μεθόδων*. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). Θέρμη. 117 σελ.

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Ι.Ν. Ντάντος, Δ.Α. Κατέρης, Σ. Παπουτσή-Ψυχουδάκη και Β.Π. Φράγκος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής
Σχολή Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 54124, Τηλ. 2310998716

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επιλύονται αριθμητικά δύο περιπτώσεις της ροής αέρα πάνω από διαδοχικές αγροτικές κατασκευές, μέσα σε αεροσήραγγα. Οι διέπουσες εξισώσεις του φαινομένου, Navier – Stokes και συνέχειας, επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος Galerkin. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως προς το ύψος των κατασκευών και την ομοιόμορφη ταχύτητα στην είσοδο του πεδίου ροής. Οι αριθμοί Reynolds κυμαίνονται από 0.02 μέχρι 1400 για τις δύο αγροτικές κατασκευές παραβολικής οροφής και από 0.02 μέχρι 1240 για τις δύο κατασκευές ορθογωνικής οροφής. Η ροή βασικά είναι ιξώδης, ασυμπίεστη, σταθερή και διδιάστατη, ενώ το μήκος των κατασκευών εκτείνεται σε ολόκληρο το πλάτος της αεροσήραγγας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα, όπως γραμμές ροής, μήκος αποκόλλησης και προσκόλλησης, γραμμές ίσης πίεσης, γραμμές ίσου στροβιλισμού και κινητικής ενέργειας παρουσιάζονται και συγκρίνονται ποιοτικά με εργασίες άλλων ερευνητών με σκοπό την επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: εξισώσεις Navier – Stokes, πεπερασμένα στοιχεία, διδιάστατη ιξώδη ροή, αγροτικές κατασκευές.

TWO – DIMENSIONAL COMPUTATIONAL ANALYSIS OF AIRFLOW OVER TWO SUCCESSIVE AGRICULTURAL STRUCTURES

J.N. Dados, D.L. Kateris, S. Papoutsi–Psychoudaki and V.P. Fragos

Department of Hydraulics, Soil Sciences and Agricultural Engineering,
School of Agriculture, Aristotle University, GR-54124 Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

The present work studies, numerically, two airflows over successive agricultural structures, into a wind tunnel. The governing Navier – Stokes and continuity equations are solved numerically, using the Method of Galerkin. The Reynolds number is calculated according to the height of the structures and the inlet free stream velocity. The Reynolds numbers are varied from 0.02 to 1400 for the agricultural structures with parabolic roofs and from 0.02 to 1240 for the structures with rectangular roofs. The flow is viscous, incompressible, steady and nominated to be two-dimensional, while the structures are extended to the whole width of the tunnel. Numerical predictions such as streamlines, separation and reattachment length, contours of pressure isobars, vorticity and kinetic energy are presented and compared qualitatively with the work of other researchers in order to validate the numerical model.

Key words: Navier – Stokes equations, finite elements, two-dimensional viscous flow, agricultural structures.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνεμος είναι συνήθως η βασικότερη αιτία καταπόνησης, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην κατασκευή αγροτικών βιομηχανικών ή αστικών κατασκευών. Τα φορτία, που δημιουργούν οι ισχυροί άνεμοι πάνω στις κατασκευές, (με αποτέλεσμα την καταστροφή ή τη φθορά των δομικών τους στοιχείων) και η μεταφορά και συσσώρευση αέρα, νερού, σκόνης, καυσαερίων, ακόμη και χιονιού, (προκαλώντας θορύβους και μολύνσεις και επηρεάζοντας τα συστήματα θέρμανσης και αερισμού – εξαερισμού), είναι οι σημαντικότεροι λόγοι για πειραματική, θεωρητική και υπολογιστική μελέτη της ροής αέρα γύρω και πάνω από κατασκευές.

Η σταθερή, ασυμπίεστη, διδιάστατη, ιζώδης ροή πάνω από διαφόρου τύπου κατασκευές, έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Acrivos et al. (1968) για τις πειραματικές μελέτες του σ' ένα μεγάλο εύρος κατασκευών και ρευστών. Οι Macagno and Hung (1967), που εργάστηκαν πειραματικά σ' ένα μοντέλο με διαπλάτυνση, οι Denham and Patric (1974), που μελέτησαν πειραματικά τη ροή πάνω από ένα καταβαθμό. Με τη ροή πάνω από καταβαθμό σε αεροσήραγγα, ασχολήθηκαν και οι Armally et al. (1983), για $70 \leq Re \leq 8000$, οι Antoniou and Bergeles (1988) μελέτησαν την επίδραση της γεωμετρίας της κατασκευής στην περιοχή ανακυκλοφορίας κατάντη ενός εδρασμένου πρίσματος, σε αεροσήραγγα.

Με την αριθμητική επίλυση των μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν σταθερή, διδιάστατη, ιζώδη ροή, (εξισώσεις Navier – Stokes και συνέχειας), έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης των εξισώσεων όπως και διαφορετικές μεθόδους επίλυσής τους. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Macagno και Hung (1967) που χρησιμοποίησαν την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των εξισώσεων, οι Leone and Gresho (1981), που προσομοίωσαν σταθερή ροή πάνω από καταβαθμό επιλύοντας τις εξισώσεις Navier – Stokes και συνέχειας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι Ying et al. (1991) μετασχημάτισαν τις εξισώσεις Navier – Stokes και συνέχειας σε εξισώσεις στροβιλισμού και τις επίλυσαν με την πεπλεγμένη μέθοδο των εναλλασσόμενων κατευθύνσεων (ADI). Οι Fragos et al. (1997), μελέτησαν ιζώδες μοντέλο σταθερής ροής, πάνω από ένα ορθογωνικό εδρασμένο εμπόδιο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Με την επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ασχολήθηκαν οι Boum et al. (1999). Οι Psychoudaki et al. (2005) μελέτησαν ροή πάνω από παραβολικό εμπόδιο σε αεροσήραγγα, αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Galerkin. Ο Δ. Κατέρης (2009), στην μεταπτυχιακή του διατριβή, ασχολήθηκε με την επίλυση των εξισώσεων ιζώδους ροής πάνω από διπλό και τριπλό τροποποιημένο θερμοκήπιο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Galerkin.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με δύο περιπτώσεις μαθηματικής προσομοίωσης ροής αέρα πάνω από δύο διαδοχικές αγροτικές κατασκευές παραβολικής και ορθογωνικής οροφής, χρησιμοποιώντας το μοντέλο των πραγματικών ρευστών (εξισώσεις N – S, εξίσωση συνέχειας). Οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι πειραματικές συνθήκες ροής μέσα σε μια αεροδυναμική σήραγγα. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφεται από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης επιλύεται με μια από τις πιο σύγχρονες μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μέθοδο Galerkin).

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΩΔΟΥΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σταθερή, ασυμπίεστη, διδιάστατη ροή αέρα, πάνω από δύο διαδοχικές κατασκευές που υποθετικά βρίσκονται σε αεροσήραγγα, είναι οι εξισώσεις Navier – Stokes (N-S) και συνέχειας:

Εξισώσεις κίνησης (εξισώσεις N-S)

$$\square (\vec{\nabla} \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad , \quad (2.1)$$

Εξισώσεις διατήρησης της μάζας (συνέχειας)

$$\square \vec{\nabla} \vec{V} = 0 \quad , \quad (2.2)$$

όπου: $\vec{\nabla}$ = ανάδελτα, $\vec{V}$ = διάνυσμα ταχύτητας, σε m/s, p = ένταση πίεσης ρευστού, σε N/m², ν = κινηματικό ιξώδες ρευστού, σε m²/s και ρ = πυκνότητα ρευστού, σε Ns²/m⁴.

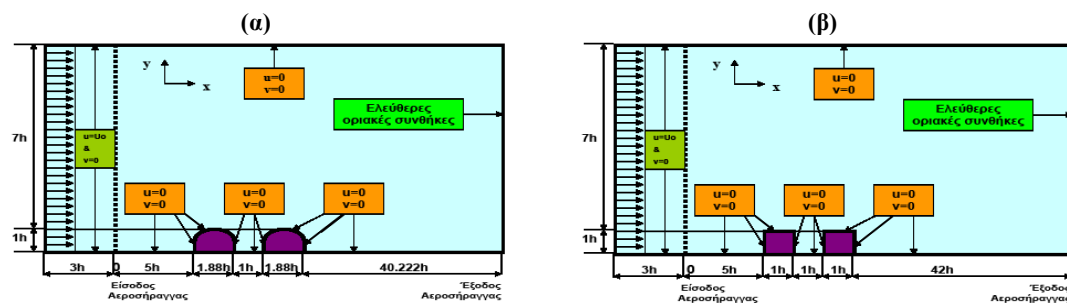
Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποίησαν οι Φράγκος (1995), Λάσκος (2006) και Κατέρης (2009), στην μεταπτυχιακή τους διατριβή. Στην είσοδο της υπολογιστικής περιοχής επιλέγεται η συνθήκη της ομοιόμορφης ταχύτητας, (ανάντη οριακή συνθήκη):

$$\square u = U_0 \text{ και } v = 0, \quad (2.3 \alpha)$$

Κατά μήκος του πάνω και κάτω τοιχώματος της αεροσήραγγας καθώς και πάνω στις πλευρές και στα τοιχώματα των κατασκευών παραβολικής και ορθογωνικής οροφής, εφαρμόζεται η συνθήκη της μη-ολισθήσεως, (**no-slip condition**) ή μηδενικών ταχυτήτων, που μαθηματικώς διατυπώνεται ως εξής:

$$\square u = 0 \text{ και } v = 0, \quad (2.3 \beta)$$

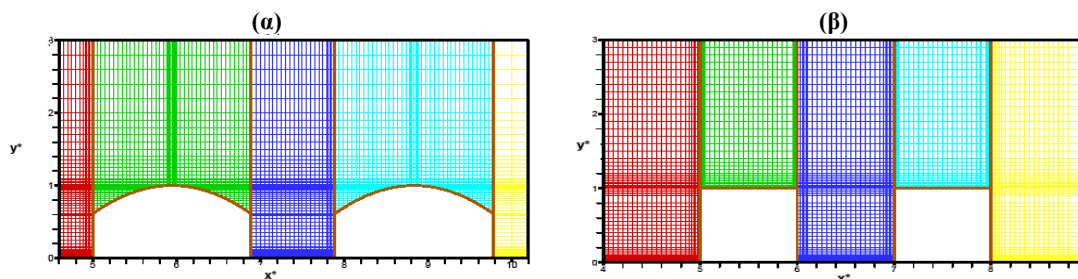
Για την κατάντη οριακή συνθήκη (έξοδος υπολογιστικού πεδίου) επιλέχθηκαν οι «ελεύθερες οριακές συνθήκες» (**free boundary conditions**) οι οποίες προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Λεπτομέρειες της υπολογιστικής περιοχής λύσης των τοξωτών και ορθογωνικών κατασκευών, με τις οριακές συνθήκες, παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 α και 1 β.



Σχήμα 1 α,β. Υπολογιστική περιοχή λύσης και οριακές συνθήκες της διδιάστατης ροής πάνω από δύο κατασκευές: (α) παραβολικής και (β) ορθογωνικής οροφής.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η επίλυση του διαφορικού συστήματος των μαθηματικών εξισώσεων (2.1) και (2.2), με οριακές συνθήκες τις (2.2) και (2.3), πραγματοποιείται με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η λύση περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση (discretization) της περιοχής λύσης σε τετραπλευρικά και τριγωνικά στοιχεία, (Σχήματα 2 α, β).



Σχήμα 2 α,β. Διακριτοποίηση της περιοχής λύσης πάνω από δύο κατασκευές: (α) παραβολικής και (β) ορθογωνικής οροφής.

Πιο συγκεκριμένα, τα γειτονικά στοιχεία γύρω από την παραβολική οροφή των κατασκευών (1^η περίπτωση) είναι τριγωνικά με καμπύλες πλευρές ενώ γύρω από την ορθογωνική οροφή των κατασκευών (2^η περίπτωση) είναι τετραπλευρικά. Στην υπόλοιπη περιοχή λύσης χρησιμοποιούμε τετραπλευρικά στοιχεία. Με την παραπάνω μέθοδο επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου ροής με το μικρότερο δυνατό σφάλμα.

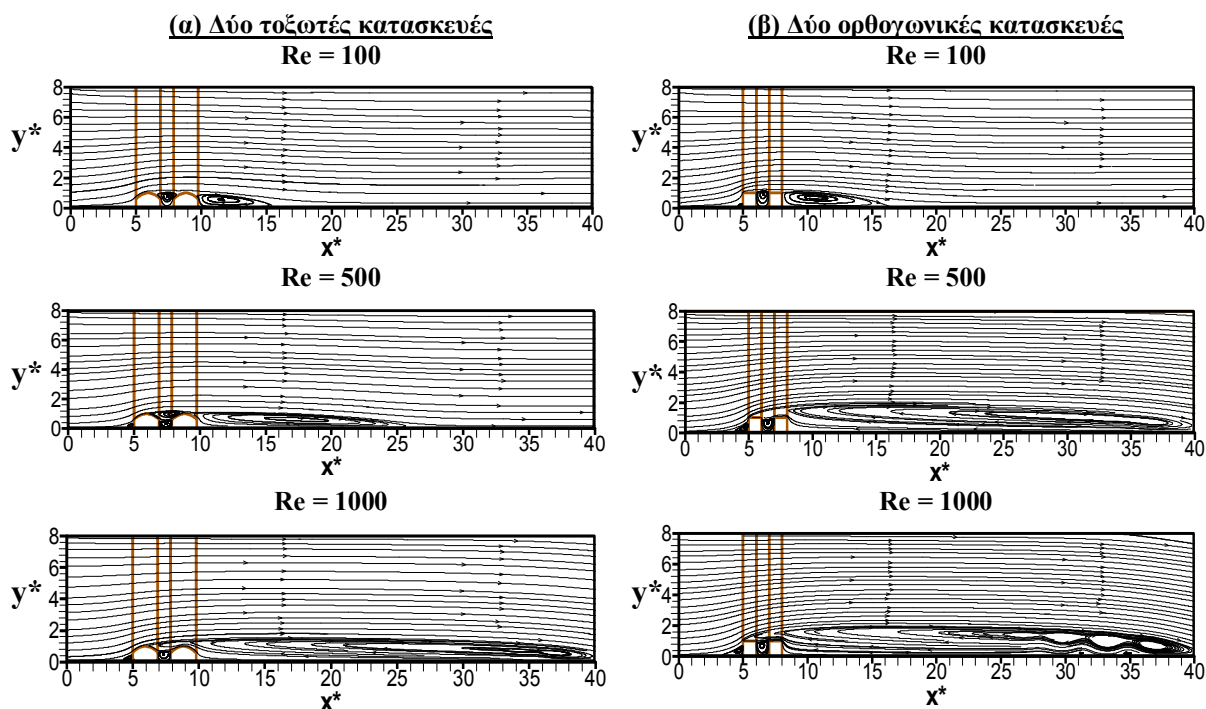
Στον Πίνακα 1, δίνονται τα στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου ροής και του προγράμματος, σε γλώσσα **VISUAL FORTRAN 90/95**. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι άγνωστες αδιαστατοποιημένες μεταβλητές u^* , v^* και p^* σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά μεγέθη της εφαρμογής και τα στοιχεία των προγραμμάτων.

a/a	Χαρακτηριστικά μεγέθη του υπολογιστικού πεδίου	Δύο τοξωτά εμπόδια	Δύο ορθογωνικά εμπόδια
1.	Αδιάστατο ύψος υπολογιστικού πεδίου (H)	8	8
2.	Αδιάστατο μήκος υπολογιστικού πεδίου (L)	40	40
3.	Διακύμανση αριθμών Reynolds	0.02 – 1400	0.02 – 1240
4.	Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων του υπολογιστικού πεδίου (NE)	21.656	25.868
5.	Πλήθος κόμβων του υπολογιστικού πεδίου (NH)	87.287	104.381
6.	Συνολικός αριθμός των αγνώστων του υπολογιστικού πεδίου (NP)	196.610	235.085
7.	Χρόνος για κάθε επανάληψη	2.81 min	1.46 min
8.	Εύρος χωρικού βήματος τόσο κατά τον άξονα των x όσο και κατά τον άξονα των y	$0.001 \leq \Delta x \leq 1$ $0.001 \leq \Delta y \leq 1$	$0.001 \leq \Delta x \leq 1$ $0.005 \leq \Delta y \leq 0.5$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

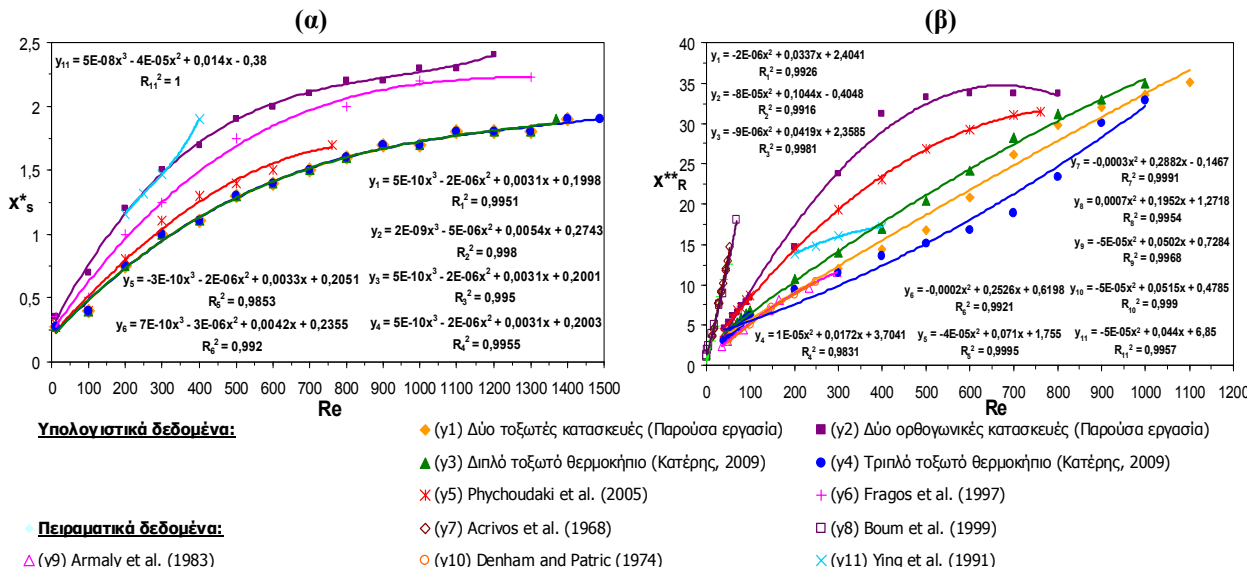
Στα Σχήματα 3 α,β παρουσιάζονται ενδεικτικά οι γραμμές ροής σε όλο το μήκος της περιοχής λύσης, για αριθμούς Reynolds, $Re=100$, 500 και 1000 για τις κατασκευές παραβολικής και ορθογωνικής οροφής.



Σχήμα 3 α,β. Γραμμές ροής σε όλη την περιοχή λύσης της ροής ανάντη και κατάντη των δύο κατασκευών: (α) παραβολικής και (β) ορθογωνικής οροφής, για αριθμούς Reynolds 100, 500, 1000.

Στις κατανομές των γραμμών ροής εμφανίζονται τρεις περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής, ανάντη της 1^{ης} κατασκευής, ανάμεσα στις δύο κατασκευές και κατάντη της 2^{ης} κατασκευής. Διαπιστώνεται ότι το σημείο αποκόλλησης πάνω στις κατασκευές μετακινείται προς τα ανάντη και το μήκος ανακυκλοφορίας της ροής κατάντη της 2^{ης} κατασκευής αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Παρατηρείται ότι, για τον ίδιο αριθμό Re, το μήκος ανακυκλοφορίας κατάντη της 2^{ης} ορθογωνικής κατασκευής είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό της τοξωτής κατασκευής.

Στο Σχήμα 4 α, παρουσιάζεται σύγκριση του μήκους αποκόλλησης, x_s^* , των εργασιών των Ying et al. (1991), Fragos et al. (1997), Phychoudaki et al. (2005), Κατέρης (2009) και της παρούσας εργασίας. Παρατηρείται ότι το μήκος αποκόλλησης αυξάνεται σε σχέση με την αύξηση του αριθμού Re, μη αναλογικά λόγω του διαφορετικού σχήματος και των διαστάσεων των κατασκευών. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μερική ταύτιση των τιμών μεταξύ της παρούσας εργασίας (ορθογωνικές διαδοχικές κατασκευές) και της εργασίας των Ying et al. Επίσης υπάρχει ταύτιση στις κατανομές της παρούσας εργασίας, (τοξωτές διαδοχικές κατασκευές), με τις τιμές του Κατέρη (2009), (για διπλό και τριπλό τοξωτό θερμοκήπιο). Η εξίσωση που περιγράφει τις κατανομές του μήκους αποκόλλησης είναι παραπλήσιο πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού για όλες τις περιπτώσεις, με συντελεστή συσχέτισης $R^2 \approx 0,99$.

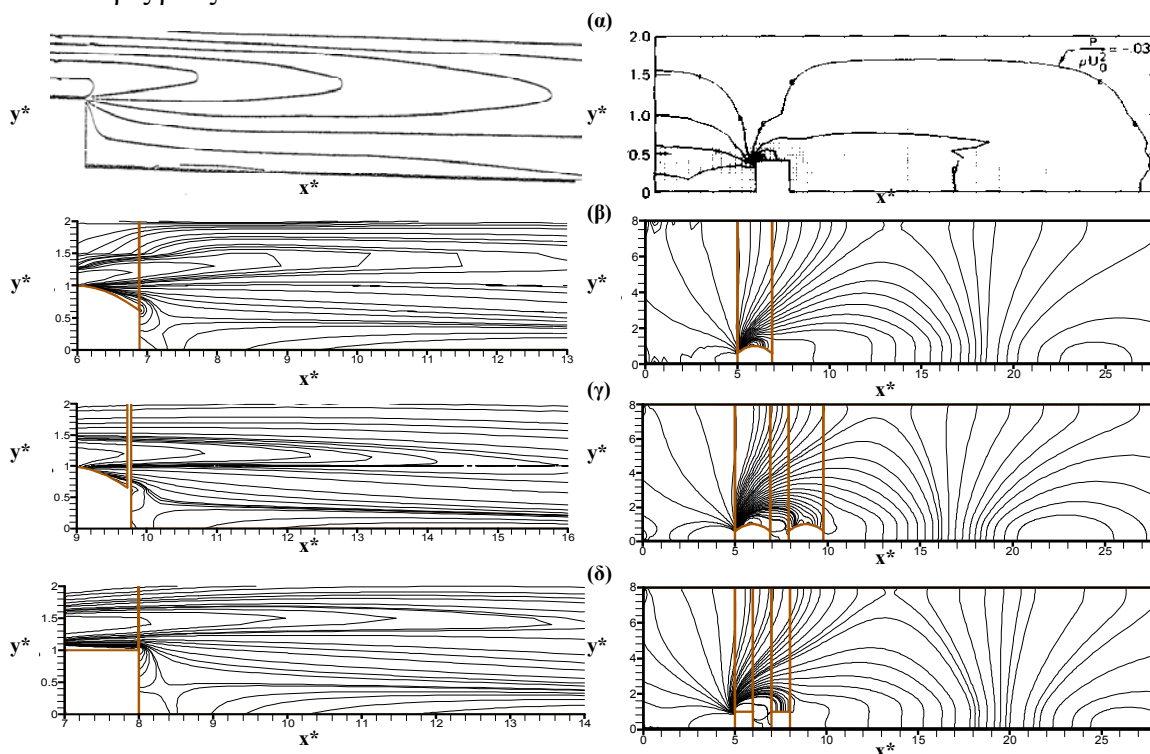


Σχήμα 4 α, β. Μήκη αποκόλλησης-προσκόλλησης της οριακής στιβάδας ως προς τον αριθμό Re: (α) μήκος αποκόλλησης ανάντη της 1^{ης} κατασκευής και (β) μήκος προσκόλλησης κατά μήκος του πυθμένα κατάντη της 2^{ης} κατασκευής. Σύγκριση της παρούσας εργασίας με άλλες υπολογιστικές και πειραματικές εργασίες.

Στο Σχήμα 4 β, συγκρίνονται τα πειραματικά δεδομένα του μήκους προσκόλλησης των Acrivos et al. (1968), Denham and Patric (1974), Armaly et al. (1983), Ying et al. (1991), Boum et al. (1999) με τα υπολογιστικά δεδομένα των εργασιών Fragos et al. (1997), Phychoudaki et al. (2005), Κατέρης (2009) και της παρούσας εργασίας. Παρατηρείται ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του μήκους προσκόλλησης με τον αριθμό Reynolds και την γεωμετρία του εμποδίου. Τα αποτελέσματα των Acrivos et al. (1968), Fragos et al. (1997), Boum et al. (1999), (με αριθμό $Re < 100$), ταυτίζονται λόγω παρόμοιας γεωμετρίας των κατασκευών. Οι υπόλοιπες κατανομές του μήκους προσκόλλησης ως προς τον αριθμό Re παρουσιάζουν μια απόκλιση η μία από την άλλη, λόγω γεωμετρίας των κατασκευών. Για $Re \leq 100$ έχουμε ταύτιση των περιπτώσεων Phychoudaki et al. (2005), (απλή τοξωτή οροφή) και παρούσας εργασίας (ορθογωνικές

κατασκευές). Ταύτιση υπάρχει και μεταξύ των Κατέρη (2009), (διπλή και τριπλή τοξωτή κατασκευή) και της παρούσας εργασίας (τοξωτές κατασκευές). Άλλη μια ταύτιση υπάρχει μεταξύ των κατανομών των Armaly et al. (1983) και Denham and Patric (1974), (καταβαθμοί), για $Re \leq 300$. Για μεγαλύτερους αριθμούς Re οι κατανομές του μήκους προσκόλλησης έχουν διαφορετική κλίση. Τη μεγαλύτερη κλίση έχει η καμπύλη των διαδοχικών ορθογωνικών κατασκευών της παρούσας εργασίας, ακολουθεί η απλή τοξωτή κατασκευή (Psychoudaki et al. 2005), έπεται η διπλή τοξωτή κατασκευή (Κατέρη, 2009) και με μικρότερες κλίσεις ακολουθούν οι κατανομές των διαδοχικών τοξωτών κατασκευών (παρούσα εργασία) και τέλος η τριπλή τοξωτή κατασκευή (Κατέρη, 2009).

Στα Σχήματα 5 α έως δ παρουσιάζεται ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσου στροβιλισμού για $Re=200$ μεταξύ των Macagno and Hung (1967) και του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία. Παρατηρούμε την ομοιότητα των κατανομών και στις τέσσερις ροές.



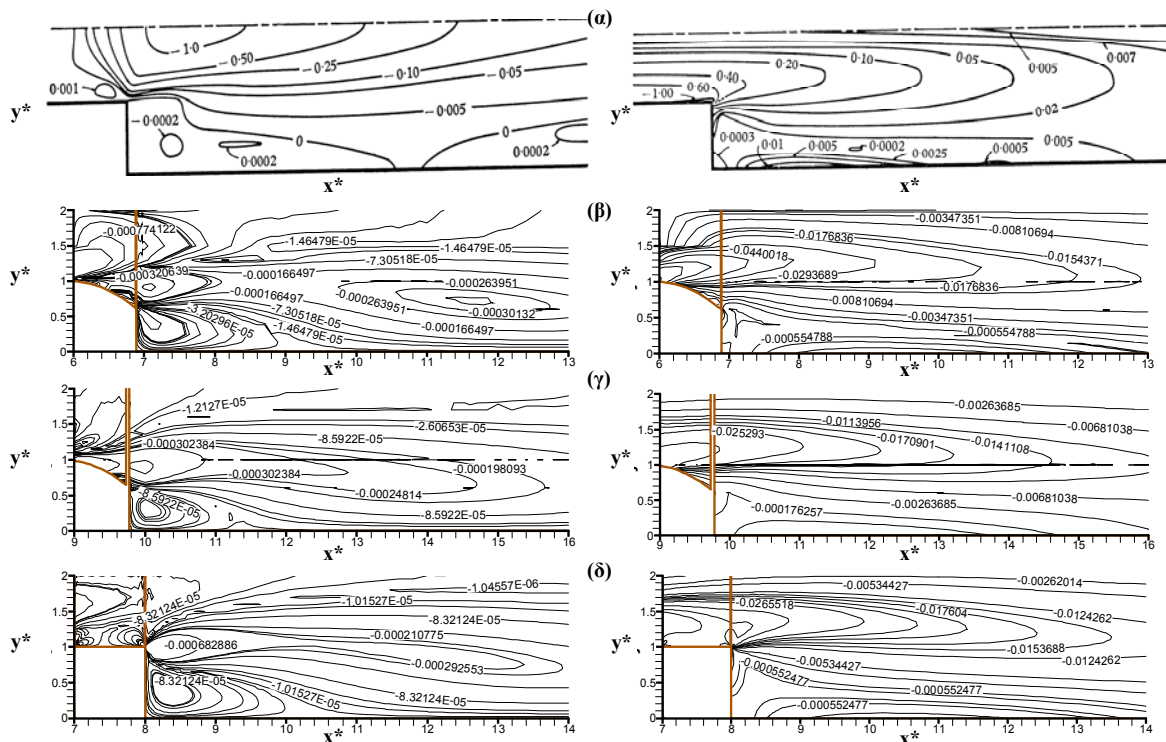
Σχήμα 5 α,β,γ,δ. Ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσου στροβιλισμού για $Re=200$ μεταξύ: (α) των Macagno and Hung (1967), (β) του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία για διαδοχικές κατασκευές (γ) παραβολικής και (δ) ορθογωνικής οροφής.

Σχήμα 6 α,β,γ,δ. Ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσης πίεσης για $Re=200$ μεταξύ: (α) των Leone et al. (1981), (β) του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία για διαδοχικές κατασκευές (γ) παραβολικής και (δ) ορθογωνικής οροφής.

Στα Σχήματα 6 α έως δ απεικονίζεται ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσης πίεσης, για $Re=200$ μεταξύ των Leone et al. (1981) και του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται οι κατανομές των γραμμών ίσης πίεσης κατάντη των κατασκευών είναι παρόμοιες. Οι κατανομές ίσης πίεσης του Λάσκου (2006) και της παρούσας εργασίας δίνουν περισσότερες λεπτομέρειες σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, λόγω των πυκνότερων υπολογιστικών πλεγμάτων.

Στα Σχήματα 7 α έως δ και 8 α έως δ απεικονίζεται ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσης διαπήδησης της κινητικής ενέργειας (Convection of kinetic energy) και ίσων απωλειών της κινητικής ενέργειας (Dissipation of kinetic energy), αντίστοιχα, για $Re=60$, μεταξύ των Macagno and Hung (1967), (ροή κατάντη διαπλάτυνσης), και του

Λάσκου (2006), (ροή κατάντη απλού παραβολικού τόξου), με την παρούσα εργασία (ροή κατάντη διαδοχικών παραβολικών και ορθογωνικών οροφών). Η ομοιότητα στην σύγκριση είναι προφανής.



Σχήμα 7 α, β, γ, δ. Ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσης διαπήδησης της κινητικής ενέργειας (Convection of kinetic energy), για $Re=60$ μεταξύ: (α) των Macagno and Hung (1967), (β) του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία για διαδοχικές κατασκευές (γ) παραβολικής και (δ) ορθογωνικής οροφής.

Σχήμα 8 α, β, γ, δ. Ποιοτική σύγκριση των γραμμών ίσων απωλειών της κινητικής ενέργειας (Dissipation of kinetic energy), για $Re=60$ μεταξύ: (α) των Macagno and Hung (1967), (β) του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία για διαδοχικές κατασκευές (γ) παραβολικής και (δ) ορθογωνικής οροφής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις μαθηματικής προσομοίωσης, για διδιάστατη, σταθερή και ασυμπίεστη ιξώδη ροή αέρα πάνω από δύο διαφορετικής γεωμετρίας κατασκευές, α) οροφής παραβολικού τόξου (θερμοκήπια), ($0,02 \leq Re \leq 1400$) και β) ορθογωνικής οροφής (αποθήκες), ($0,02 \leq Re \leq 1240$). Ο αριθμός Reynolds υπολογίστηκε με βάση το ύψος των κατασκευών και την ταχύτητα της ομοιόμορφης ροής.

Εμφανίζονται τρεις περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής, ανάντη, μεταξύ και κατάντη των κατασκευών, με αρνητικές τιμές ταχύτητας. Σημεία αποκόλλησης έχουμε ανάντη και πάνω στην οροφή της $1^{\text{ης}}$ κατασκευής. Σημεία προσκόλλησης παρατηρούνται στην ανάντη κάθετη πλευρά της $1^{\text{ης}}$ κατασκευής και στον πυθμένα κατάντη της $2^{\text{ης}}$ κατασκευής.

Οι συγκρίσεις του μήκους αποκόλλησης ανάντη των κατασκευών (x_s^*) και του μήκους προσκόλλησης κατάντη των κατασκευών ($x_{(R)}^{**}$), της παρούσας εργασίας με άλλες υπολογιστικές και πειραματικές εργασίες έχουν άμεση συσχέτιση με τον αριθμό Reynolds, $(Re)_h$ και την γεωμετρία της κατασκευής. Το μήκος αποκόλλησης x_s^* και το μήκος προσκόλλησης $x_{(R)}^{**}$ αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Re , μη αναλογικά, λόγω του διαφορετικού σχήματος και των διαστάσεων των κατασκευών.

Ποιοτικές συγκρίσεις των γραμμών ίσου στροβιλισμού μεταξύ της παρούσας εργασίας με αυτές των Macagno and Hung (1967) και Λάσκου (2006), έδειξαν ικανοποιητική ομοιότητα. Η παρουσία των κατασκευών διαταράσσουν τη ροή σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, ακόμη και για μικρούς αριθμούς Reynolds.

Ποιοτική σύγκριση των καμπυλών ίσης πίεσης της παρούσας εργασίας με των Leone et al. (1981) και Λάσκος (2006), έδειξε παρόμοια κατανομή των γραμμών ίσης πίεσης.

Επίσης, σύγκριση των γραμμών ίσης διαπήδησης της κινητικής ενέργειας (Convection of kinetic energy) και ίσης απώλειας της κινητικής ενέργειας (Dissipation of kinetic energy), μεταξύ των Macagno and Hung (1967) και του Λάσκου (2006), με την παρούσα εργασία, έδειξε εμφανή ομοιότητα στην κατανομή των γραμμών κατάντη των κατασκευών και της διαπλάτυνσης για $Re=60$.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω, είναι ότι η γεωμετρία των κατασκευών και οι διαστάσεις τους επηρεάζουν τη ροή τόσο ανάντη, μεταξύ και κατάντη των κατασκευών, όσο και τη ροή σε όλο το υπολογιστικό πεδίο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acrivos, A., Leal, L.G., Snowden, D.D. and Pan, F., 1968. *Further experiments on steady separated flows past bluff objects*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 34, part 1, p.p. 25-48.
- Antoniou, J. and Bergeles, G., 1988. *Development of the Reattached Flow Behind Surface-Mounted Two-Dimensional Prisms*. Journal of Fluids Engineering, vol. 110, p.p. 127-133.
- Armaly B.F., Durst F., Pereira J.C.F. and Schonung B., 1983. *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow*. Journal of fluid Mechanics, vol. 127, p.p. 473-496.
- Boum, Ngo G.B., Martemianov, S. and Alemany, A., 1999. *Computational study of laminar flow and mass transfer around a surface-mounted obstacle*. International Journal of heat and mass transfer, vol. 42, p.p. 2849-2861.
- Denham, M. K. and Patrick, M. A., 1974. *Laminar Flow over a Downstream-facing Step in a Two-Dimensional Flow Channel*, Trans. Inst. Chem. Engrs, vol. 52, p.p. 361-367.
- Fragos, V.P., Psychoudaki, S.P. and Malamataris, N.A., 1997. *Computer-aided analysis of flow past a surface-mounted obstacle*. International Journal for numerical methods in fluids, vol. 25, p.p. 495-512.
- Φράγκος, Β.Π., 1995. *Μαθηματική προσομοίωση της ροής αέρα γύρω από σταθερό επιφανειακό εμπόδιο*. Διπλωματική μεταπτυχιακή διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Κατέρης, Δ.Α., 2009. *Επίδραση της ροής του αέρα σε θερμοκήπιο ως προς το πλάτος του*, Διπλωματική μεταπτυχιακή διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Λάσκος, Β.Ν., 2006. *Μαθηματική προσομοίωση ροής αέρα πάνω από τοξωτό θερμοκήπιο*, Διπλωματική μεταπτυχιακή διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Leone John M. and Gresho Philip M., 1981. *Finite element simulations of steady, two dimensional, viscous incompressible flow over a step*. Journal of computational physics, vol. 41, p.p. 167-191.
- Macagno, Enzo O. and Hung Tin-Kan, 1967. *Computational and experimental study of a captive annular eddy*, Journal of fluid Mechanics, vol. 28, part 1, p.p. 43-64.
- Psychoudaki S.P., Laskos V.N., Fragos V.P., 2005. *Numerical Analysis of Viscous Flow over a mounted Parabolic Body*. IASME Transactions, Issue 7, vol.2, p.p. 1207-1216.
- Ying-Jong, Hong, Shou-Shing, Hsieh and Huei-Jan, Shih, 1991. *Numerical computation of laminar separation and reattachment of flow over surface mounted ribs*. Journal of fluids Engineering, vol. 113, p.p. 190-198.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ & ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ

Κ. Μπαξεβάνου¹, Δ. Φεΐδαρος², Δ. Παπαναστασίου³, Θ. Μπαρτζάνας⁴ και Κ. Κίττας⁵
^{1,2,3,4,5}Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης Αγρο-Οικοσυστημάτων, Κέντρο Έρευνας
Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, 1^η Βιομηχανική Περιοχή, Τ.Κ. 38500 Βόλος
⁵Εργαστήριο Γεωργικών Κατ/ών και Ελέγχου Περ/ντος, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτ. Παρ/γής
και Αγρ. Περ/ντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Τ.Κ 38446:
E-mails: ¹cbaxe@cereteth.gr, ²dfeid@cereteth.gr, ³dkpapan@cereteth.gr,
⁴bartzanas@cereteth.gr, ⁵ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο για τη μελέτη της μεταβολής της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του αέρα, της υγρασίας και της συγκέντρωσης της αμμωνίας που προέρχεται από κοπριά αιγοπροβάτων εντός υφιστάμενου κτηνοτροφικού κτιρίου. Δεδομένου ότι, αφενός μεν σημαντικές ποσότητες αερίων ρύπων και σωματιδίων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από γεωργο-κτηνοτροφικές δραστηριότητες, αφετέρου δε το εσωτερικό μικροκλίμα σε ένα κτηνοτροφικό κτίριο είναι σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη υγείων ζώων, ένα αριθμητικό μοντέλο ικανό να εκτιμήσει το εσωτερικό μικροκλίμα και την κατανομή της συγκέντρωσης αμμωνίας στο εσωτερικό του θα ήταν ένα πολύτιμο εργαλείο στο σχεδιασμό κτηνοτροφικών κτιρίων και των Η/Μ συστημάτων του. Η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχθηκε επιτυχώς συγκρίνοντας με μετρήσεις στο κτίριο αυτό.

Λέξεις κλειδιά: Κτηνοτροφικό κτίριο, εσωτερικό μικροκλίμα, εκπομπές αμμωνίας, Αριθμητική προσομοίωση.

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW & TRANSPORT PHENOMENA IN LIVESTOCK BUILDING

C. Baxevanou¹, D. Fidaros², D. Papanastasiou³, T. Bartzanas⁴ & C. Kittas⁵
^{1,2,3,4,5}Institute of Technology and Management of Agricultural Ecosystems, Centre for
Research and Technology-Thessaly, 1st Industrial Area, P.C. 38500 Volos
⁵Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, School of
Agricultural Sciences, University of Thessaly, P.C 38446, N. Ionia, Magnesia
E-mails: ¹cbaxe@cereteth.gr, ²dfeid@cereteth.gr, ³dkpapan@cereteth.gr,
⁴bartzanas@cereteth.gr, ⁵ckittas@uth.gr

ABSTRACT

In the present work, a numerical model for the prediction of temperature, air velocity, relative humidity and ammonia dispersion caused by sheep and goats manure inside an existed naturally ventilated livestock building is presented. Given that noteworthy amounts of gas pollutants are emitted to the environment by agricultural and animal husbandry activities, it is essential to be inquired for the healthy growth of the breeding stock the interior microclimate distribution. A numerical model capable to predict the distribution of the main parameters of the interior climatic conditions plus the ammonia dispersion would be a valuable tool for the designing of a livestock building and its electromechanical subsystems in order to ensure healthy growth standards for the breeding stock. The model was successfully validated against measurements in this building.

Key words: Livestock building, interior microclimate, ammonia emission, numerical simulation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο φυσικός αερισμός των κτηνοτροφικών κτιρίων είναι μια συνήθης πρακτική εναλλαγή του εσωτερικού αέρα και απομάκρυνσης των εκλυόμενων ρύπων. Τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού πολλών κτηνοτροφικών κτιρίων ακολουθούν συνήθεις και τυπικές διαμορφώσεις για τον φυσικό τους αερισμό, κοινές για θερινές και χειμερινές περιόδους, με μεγάλα εκατέρωθεν ανοίγματα στην κύρια επιμήκη διεύθυνση του κτιρίου. Αυτά, τα ανοίγματα είναι ανοιγοκλειόμενα ανάλογα με εξωτερικές καιρικές συνθήκες, επιτρέποντας την ανανέωση του αέρα. Παράλληλα υπάρχουν και μικρές μόνιμες οπές αερισμού σε αρκετά μεγάλο ύψος έτσι ώστε να επιτρέπουν την διαφυγή του θερμού αέρα, λόγω υποπίεσης σε ανεμώδεις συνθήκες ή λόγω θερμικής άνωσης σε καλοκαιρία. Ο τελικός σχεδιασμός του αερισμού των κατασκευών αυτών επιχειρεί να ικανοποιήσει ταυτόχρονα την ανάγκης αποφυγής χαμηλών θερμοκρασιών που θα έβλαπταν τα ζώα και τη ανάγκη ανανέωσης του εσωτερικού αέρα. Η εξασφάλιση ικανοποιητικών εσωτερικών συνθηκών για τα σταβλισμένα ζώα απαιτεί την κατανόηση των κατανομών των βασικών παραμέτρων που συνθέτουν το εσωτερικό μικροκλίμα (ταχύτητες εσωτερικού αέρα, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, αέριοι & σωματιδιακοί ρύποι) λαμβάνοντας υπόψη και τον χώρο που καταλαμβάνουν τα ζώα. Στα φυσικώς αεριζόμενα κτίρια το εσωτερικό περιβάλλον επηρεάζεται άμεσα από την ταχύτητα και την διεύθυνση του εξωτερικού αέρα, όπως επίσης και από την τυρβώδη φύση της ροής. Στις εργασίες των Barrington et al. (1994) και Christiaens (1994) που ασχολήθηκαν με ανάλογα κτίρια με βοοειδή, προέκυψε ότι, στο μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου στα κτίρια αυτά, μπορεί να αγνοηθούν οι θερμικές ανωστικές δυνάμεις στη διαμόρφωση του πεδίου ροής στο εσωτερικό τους, καθώς αυτή καθορίζεται από τον προσανατολισμό του κτιρίου και από την επικρατούσα διεύθυνση ανέμου. Κατά συνέπεια το εσωτερικό κλίμα υπόκειται σε μεγάλες διακυμάνσεις, οι οποίες μπορεί να έχουν επιζήμιες επιδράσεις στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα και στην άνεση των ζώων. Ιδιαίτερα, τα μικρής ηλικίας ζώα είναι αρκετά ευάλωτα σε αυτές (Kelly, 1983). Στην πραγματικότητα, οι επιδημίες λειτουργούν ως περιοριστικός παράγοντας στην αναπαραγωγή των ζώων, καθώς η σχέση μεταξύ επιδημιών και στεγασμένου περιβάλλοντος είναι προφανής και αλληλένδετη (Lago et al, 2006), η πρόληψη της έξαρσης επιδημίας μεταξύ των σταβλισμένων ζώων απαιτεί την διατήρηση του αερισμού και της θερμικής άνεσης σε ομογενή πλαίσια και εντός καθορισμένων ορίων στο χώρο που καταλαμβάνουν τα ζώα.

Αριθμητικές τεχνικές όπως η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) μπορούν να αποδώσουν αποτελεσματικά και με ακρίβεια στην ποσοτικοποίηση των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό κτηνοτροφικών κτιρίων για διάφορες εξωτερικές συνθήκες. Παράλληλα, μπορεί να πραγματοποιηθεί παραμετρική μελέτη για διαφορετικές τιμές και διευθύνσεις της ταχύτητας του εξωτερικού αέρα και να εκτιμηθούν ενδεικτικά αποτελέσματα με τη μορφή ανυσμάτων ταχύτητας και καμπύλων κατανομής θερμοκρασίας υγρασίας και αμμωνίας σε επιλεγμένες θέσεις στο εσωτερικό του κτιρίου (Norton et al, 2007). Επιπλέον, τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως στην μελέτη κατοικιών για να συνδυαστεί η ανάλυση του πεδίου ροής με την απόδοση αερισμού, όπως το ποσοστό δυσφορούντων ενοίκων (PPD), ο λόγος ελκυσμού (DR) και ο μέσος χρόνος παραμονής του αέρα (LMA) για να αποδώσουν μια πλήρη εικόνα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Bartak et al, 2002), μπορούν να συνδυαστούν αντίστοιχα και για τις περιπτώσεις των κτηνοτροφικών κτιρίων (Norton et al, 2009).

Η γνώση και η δυνατότητα πρόβλεψης αυτών των μεγεθών θα οδηγούσε σε ορθότερες εκτιμήσεις σχεδιασμού των εν λόγω κτιρίων και στον ορθότερο έλεγχο της λειτουργίας τους. Είναι γνωστό ότι τα φυσικά πειράματα επιτρέπουν μετρήσεις φυσικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο χωρίς τις παραδοχές των αριθμητικών μοντέλων,

όμως μια αναλυτική διερεύνηση θα απαιτούσε χρονοβόρες μετρήσεις και ακριβό εξοπλισμό. Αντίθετα, οι αριθμητικές μέθοδοι επιτρέπουν την πρόβλεψη του εσωτερικού κλίματος σε αυτά τα κτίρια και δίνουν την δυνατότητα μεταβολής των παραμέτρων σχεδιασμού επιταχύνοντας σημαντικά τον χρόνο ολοκληρωμένης μελέτης αποφεύγοντας την διενέργεια μιας σειράς ακριβών και χρονοβόρων πειραμάτων.

2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η μοντελοποίηση αφορά υφιστάμενο κτηνοτροφικό κτίριο στην περιοχή του Διμηνίου Μαγνησίας, στα περίχωρα του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου που σταβλίζει σε σταθερή βάση περίπου 620 πρόβατα και 30 κατσίκια. Το κτίριο βρίσκεται στα πρηνή μικρού λόφου με προσανατολισμό παράλληλο στον άξονα Βορρά-Νότου. Το κτίριο διαθέτει αμφικλινής σκεπή που καλύπτει επιφάνεια 879 m² με κλίση 2%. Οι πλευρικοί του τοίχοι είναι απλοί δρομικοί με μεγάλα ανοίγματα κατά μήκος της ανατολικής πλευράς και μικρότερα σε αριθμό στην δυτική πλευρά, στην βόρειο και νότιο πλευρά υπάρχουν δύο μεγάλες συρόμενες μονόφυλλες πόρτες.

Στο κτίριο κατεγράφησαν, η θερμοκρασία, και η σχετική υγρασία σε 4 σημεία, από 3 συσκευές Hobo και έναν αναλυτή υψηλής ακρίβειας GRIMM 107 εγκατεστημένο σε μεταλλικό κλωβό. Ο αναλυτής έχει την δυνατότητα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM₁, PM_{2.5} & PM₁₀. Οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες καταγράφηκαν από έναν μετεωρολογικό σταθμό, τοποθετημένο σε απόσταση 20 είκοσι μέτρων νοτιοδυτικά και σε μεγαλύτερη υψομετρική θέση από το κτίριο, και από ένα μετρητικό Hobo κοντά στην νότιο είσοδο σε ύψος 3m. Η καταγραφή δεδομένων έγινε ανά 15 λεπτά για τα μετρητικά Hobo και ανά 1 λεπτό για το GRIMM 107.

2.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την κατάστρωση του αριθμητικού μοντέλου η ροή μέσα στο κτηνοτροφικό κτίριο θεωρήθηκε μόνιμη, τρισδιάστατη, ασυμπίεστη και τυρβώδης (Ferziger and Peric, 1996). Η μέσης χρονικής στιγμής Navier Stokes κατά Reynolds (RANS) για την όποια εξαρτημένη μεταβλητή Φ επιλύεται, είναι:

$$\rho U_i \partial_{x_i} \Phi = \partial_{x_i} (\Gamma_\Phi \partial_{x_i} \Phi) + S_i \quad (1)$$

Στις εξισώσεις μεταφοράς ενσωματώνονται ως πηγαίοι όροι οι επιδράσεις της φυσικής συναγωγής λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ οροφής και εδάφους, και της ροϊκής αντίστασης των ζώων. Η επίδραση της θερμικής άνωσης εισάγεται στις εξισώσεις κίνησης μέσω της υπόθεσης Boussinesq (Batchelor, 1967) με την οποία επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση και ακρίβεια, θεωρώντας σταθερή πυκνότητα σε όλες τις εξισώσεις εκτός από τον υπολογισμό του όρου άνωσης στις εξισώσεις ορμής. Τα ζώα εντός του κτιρίου αντιμετωπίζονται ως πορώδεις όγκοι (παράλληλεπίπεδα) τα οποία είναι πηγές θερμότητας, υγρασίας και αμμωνίας. Οι πορώδεις όγκοι μοντελοποιούνται με την προσθήκη του όρου S_i στις εξισώσεις κίνησης της ροής. Η συνεισφορά τους συγκεκριμένου ορού διακρίνεται στις ιξώδεις απώλειες κίνησης (σχέση Darcy) και στις αδρανειακές αντιστάσεις. Για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων σχετικής υγρασίας δηλαδή του νωπού αέρα και των υδρατμών μέσα στο κτηνοτροφικό κτίριο χρησιμοποιείται η προσέγγιση του ιδανικού δυαδικού μίγματος. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος υπολογισμού επιλύει για n-1 στοιχεία του μίγματος και ειδικότερα για τις συγκεντρώσεις υδρατμών. Ο δυαδικός συντελεστής διάχυσης βασίζεται στον νόμο του Fick (λόγω των συγκεντρωσιακών βαθμίδων) και είναι συνάρτηση της τοπικής θερμοκρασίας και πίεσης σύμφωνα με την σχέση Schirmer:

$$D_{i,m} = 2,26 \cdot 10^{-5} P^{-1} (T \cdot 273^{-1})^{1,81} \quad (2)$$

Παράλληλα ο συνολικός συντελεστής διάχυσης για την εξίσωση μεταφοράς των συγκεντρώσεων διορθώνεται με την προσθήκη της τυρβώδους συνεισφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τον τυρβώδη αριθμό Schmidt Sc_t . Η επίδραση της τύρβης στην ροή μοντελοποιείται από το k-ω μοντέλο τύρβης υψηλού αριθμού Re (Wilcox, 1994) με συναρτήσεις τοίχου.

Στο αριθμητικό μοντέλο λαμβάνεται υπόψη και η θερμότητα (αισθητή και λανθάνουσα) που αποδίδουν τα εκτρεφόμενα ζώα στο περιβάλλον, σύμφωνα με την σχέση $q_{tot} = 6.4m^{0.75} + 145y_{gain}$ (Pedersen & Sällvik, 2002) (3)

Όπου m η μάζα του ζώου σε kgf και y_{gain} το μέσο σωματικό ημερήσιο κέρδος βάρους σε kgf/day, και σύμφωνα με τους (Kettlewell et al., 2001) το 45% της θερμότητας καταγράφεται ως αισθητή και το υπόλοιπο 55% ως λανθάνουσα. Στην υπολογιστική θεώρηση, ο χώρος που καταλαμβάνουν τα ζώα καλύπτει σχεδόν όλο το δάπεδο του κτιρίου με εξαίρεση ένα κεντρικό αρθρωτό διάδρομο στο εσωτερικό του, συνολικής επιφάνειας περίπου $235m^2$. Οι χώροι που καταλαμβάνουν τα ζώα θεωρούνται επίσης πηγή υδρατμών με ειδική σταθερή εκπομπή υδρατμών ίση με 0.8 gr/(kgf hr) που προστίθεται στις περιβάλλουσες μεταφερόμενες συγκεντρώσεις υδρατμών. Παράλληλα, το έδαφος νοείται ως επιφάνεια με την μέγιστη, σταθερή και κανονικοποιημένη συγκέντρωση αμμωνίας που διασπείρεται και μεταφέρεται εντός και εκτός του κτιρίου. Ο συντελεστής διάχυσης της αμμωνίας για στρωτή ροή δίνεται από την σχέση:

$$\Gamma_{\phi} = \frac{10^{-7} T^{1.75} \sqrt{(M_{air} + M_{NH_3}) (M_{air} M_{NH_3})^{-1}}}{P \left[\sqrt[3]{(\Sigma v)_{air}} + \sqrt[3]{(\Sigma v)_{NH_3}} \right]} \quad (\text{National Research Council, 2003}) \quad (4)$$

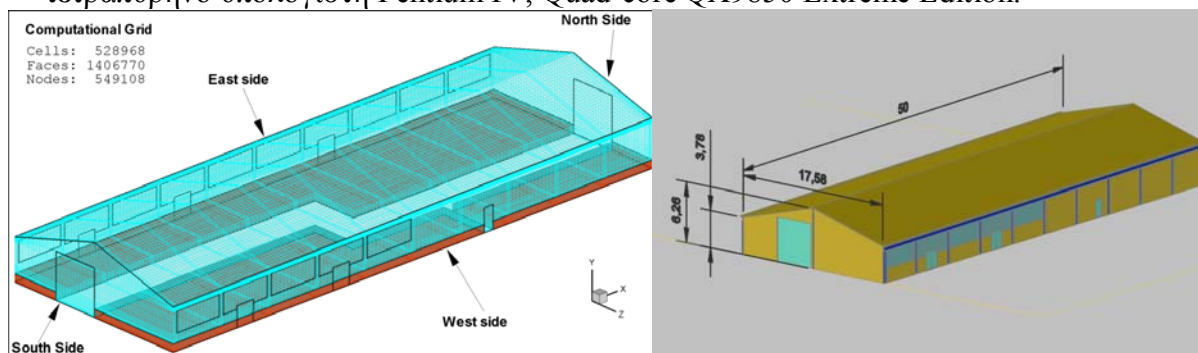
Όπου T και P είναι η τοπική θερμοκρασία και πίεση, ενώ M_x και Σv_x είναι το μοριακό βάρος και ο ειδικός γραμμομοριακός όγκος του αέρα και της αμμωνίας. Ο παραπάνω συντελεστής διάχυσης διορθώνεται με την προσθήκη της τυρβώδους συνεισφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τον τυρβώδη αριθμό Schmidt Sc_t .

Η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχθηκε μέσω των πειραματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν για το χρονικό διάστημα 3 έως 5/02/2009. Συγκεκριμένα έγινε χρήση των μετρήσεων θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας – κατεύθυνσης ανέμου που ελήφθησαν εκτός του κτιρίου, για την επιβολή οριακών συνθηκών του προβλήματος, ενώ οι τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που ελήφθησαν στο εσωτερικό αυτού και σε ύψος $1.5m$ από το έδαφος συγκρίθηκαν με τις υπολογισμένες τιμές, για να πιστοποιηθεί η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει τα ροϊκά και θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται εντός αυτού και για να ελεγχθεί η ακρίβειά του.

2.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένα δομημένο, καμπυλόγραμμο, πολυτμηματικό πλέγμα για αποδώσει ρεαλιστικά την γεωμετρία του αιγοπροβατοστασίου και οι υπολογισμοί έγιναν με τον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent. Οι εξισώσεις διατήρησης της συνέχειας, της ορμής, της ενέργειας, της μεταφοράς της τύρβης και των συγκεντρώσεων υδρατμών και αμμωνίας επιλύθηκαν αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων σε ένα πλέγμα 528000 εξαεδρικών κελιών και 44 τμημάτων μετά από δομικές ανεξαρτησίας πλέγματος. Η γεωμετρία του φυσικού προβλήματος και το είδος των συνοριακών συνθηκών δίνονται στο Σχήμα 1. Ο αλγόριθμος SIMPLEC (Versteeg & Malalasekera, 1995) υιοθετείται για την σύζευξη πίεσης-ορμής, ενώ το σχήμα διακριτοποίησης για τους όρους συναγωγής ήταν το ανάντη δευτέρας τάξης SOU (Tamamidis & Assanis, 1993) και για τους όρους διάχυσης, το σχήμα κεντρικών διαφορών. Το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης ορίστηκε ίσο

με 10^{-6} για όλες τις εξισώσεις και η τυπική διάρκεια εκτέλεσης άγγιξε τις 10 ώρες σε τετραπύρηνο υπολογιστή Pentium IV, Quad-core QX9850 Extreme Edition.



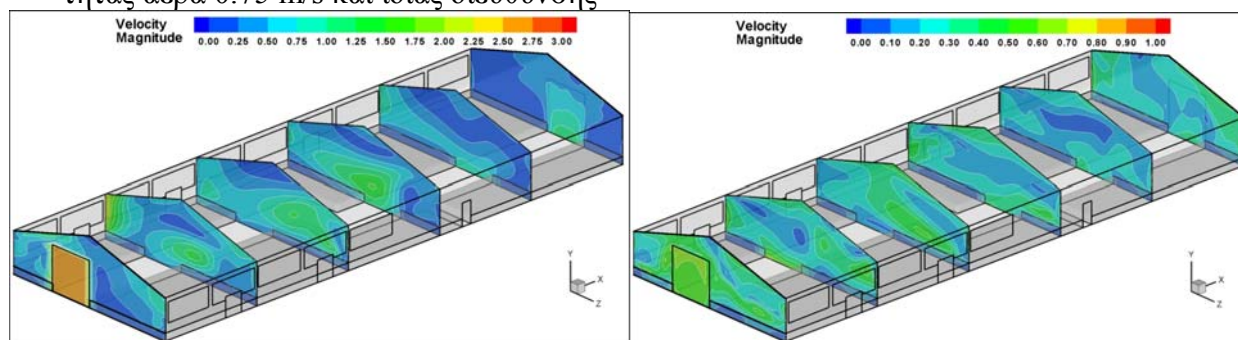
Σχήμα 1. Υπολογιστικό πλέγμα και γεωμετρία φυσικού προβλήματος.

2.4. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το αριθμητικό μοντέλο δοκιμάστηκε για δυο βασικές περιπτώσεις εξωτερικών συνθηκών για να συγκριθεί με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις, υψηλής και χαμηλής συναγωγής. Και στις δύο περιπτώσεις, ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται στο υπολογιστικό πεδίο (και στο κτηνοτροφικό κτίριο) από τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στα πλαϊνά ανοίγματα (παράθυρα) και στην νότια συρόμενη πόρτα. Από τα διαθέσιμα παράθυρα είναι ανοικτά μόνο τα μισά με σειρά εναλλάξ. Σύμφωνα με την επικρατούσα διεύθυνση ανέμου (νοτιοανατολική) κατά την διάρκεια των μετρήσεων, τα ανοίγματα στην ανατολική και νότια πλευρά αντιστοιχούν σε επιφάνειες εισόδου και τα αντίστοιχα στην βόρεια και δυτική πλευρά σε επιφάνειες εξόδου. Το δάπεδο του κτιρίου λαμβάνεται ως ισόθερμη επιφάνεια με σταθερή θερμοκρασία 10°C . Με όμοιο τρόπο ορίζονται και οι επιφανειακές θερμοκρασίες των πλαϊνών τοιχωμάτων, των κλειστών παραθύρων και της οροφής, έχοντας όμως λάβει υπόψη την θερμοπερατότητα τους, με δεδομένα τα επιμέρους πάχη τους και τον συντελεστή συναγωγής του εξωτερικού αέρα (ίσο με $8.14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Η θερμοκρασία στην πρώτη περίπτωση για τους τοίχους, την οροφή και τα κλειστά ανοίγματα είναι ίση με 15.1°C , 14.3°C και 14.85°C , αντίστοιχα και για την δεύτερη 12.8°C , 11.8°C και 12.55°C . Οι συνοριακές συνθήκες για τις μεταβλητές των εξισώσεων συγκέντρωσης έχουν σταθερή μηδενική κλίση στα τοιχώματα και την οροφή. Ενώ οι εξωτερικές θερμοκρασίες ξηρού βολβού ήταν ίσες με 13.75°C και 10.77°C και η σχετική υγρασία του αέρα ήταν 55% και 87%, αντίστοιχα.

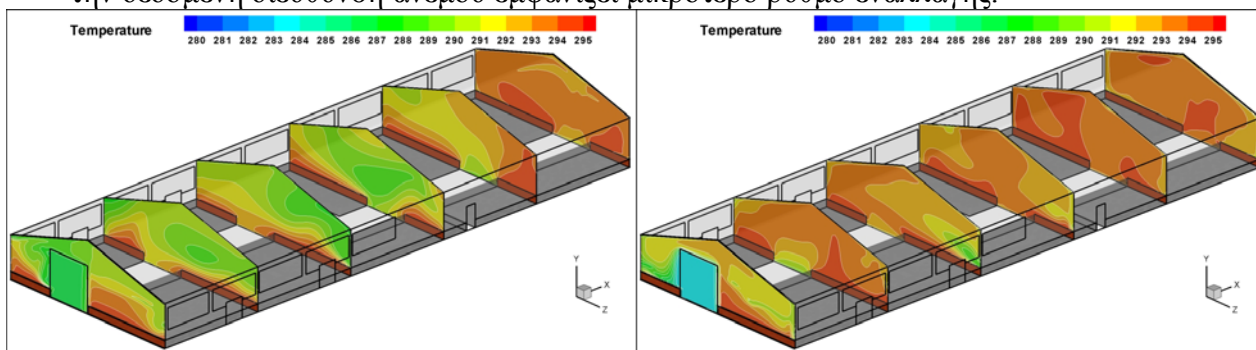
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 2 δίνονται σε επτά κατά μήκος εγκάρσιες τομές οι κατανομές της ταχύτητας για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Αριστερά εικονίζεται η περίπτωση του ισχυρά συναγωγικού ρεύματός με μέτρο ταχύτητας αέρα ίσο με 2.6 m/s και νοτιοδυτική διεύθυνση. Δεξιά παρουσιάζεται η περίπτωση της ασθενούς συναγωγής με μέτρο ταχύτητας αέρα 0.75 m/s και ίδιας διεύθυνσης.

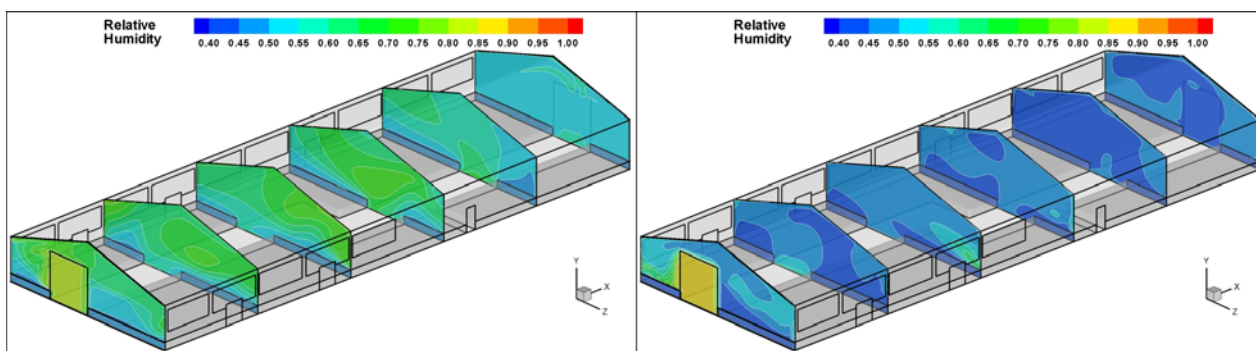


Σχήμα 2. Κατανομές ταχύτητας σε εγκάρσιες τομές του αιγοπροβατοστασίου.

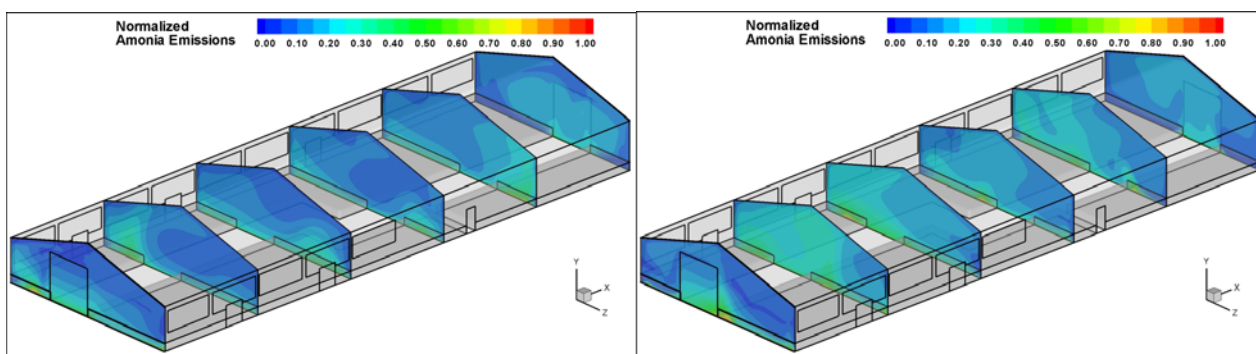
Το ισχυρό ρεύμα εισόδου σπάει σε μικρότερες δίνες για να εξέλθει από τα ανοίγματα της δυτικής και βόρειας πλευράς, με συνέπεια να δημιουργούνται επιμέρους ανακυκλοφορίες στο βορειοδυτικό τμήμα του κτιρίου. Στην περίπτωση του ασθενούς ρεύματος επαναλαμβάνεται περίπου το σχήμα με αρκετά μικρότερες ταχύτητες. Και στις δύο περιπτώσεις ο αερισμός είναι σαφώς ισχυρότερος στην νότια πτέρυγα του κτιρίου, καθώς διαθέτει τα περισσότερα ανοίγματα, αντίθετα το βόρειο του κτιρίου με την δεδομένη διεύθυνση ανέμου εμφανίζει μικρότερο ρυθμό εναλλαγής.



Σχήμα 3. Κατανομές θερμοκρασίας σε εγκάρσιες τομές για τις δύο περιπτώσεις.



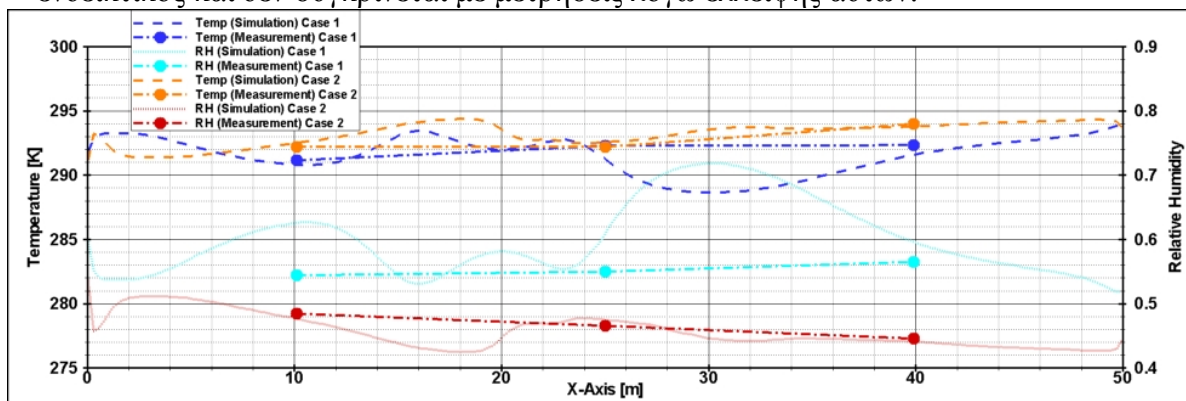
Σχήμα 4. Κατανομές σχετικής υγρασίας σε εγκάρσιες τομές για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 5. Κατανομές διασποράς NH_3 σε εγκάρσιες τομές για τις δύο περιπτώσεις

Στα Σχήματα 3 έως 5 απεικονίζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της αμμωνίας. Η ισχυρότερη συναγωγή μεταφέρει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας προς το εξωτερικό ψύχοντας με ταχύτερο ρυθμό το νότιο τμήμα του κτιρίου. Αντίθετα στην περίπτωση της ασθενούς συναγωγής η απαγωγή της θερμότητας είναι σαφέστερα μικρότερη, διατηρώντας υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας και εξασφαλίζοντας καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης για τα εκτρεφόμενα ζώα. Οι κατανομές σχετικής υγρασίας ακολουθούν τις συγκεντρώσεις των υδρατμών στο εσωτερικό κτιρίου, και έχουν αντιστρόφως ανάλογη κατανομή από την θερμοκρασία. Οι υψηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας εντοπίζονται στις περιοχές ισχυρής συναγωγής, ανάλογα

με την μέγιστη τιμή ταχύτητας, γεγονός που εξηγείται από την ισχύ της συναγωγής και από την επικράτηση χαμηλότερων θερμοκρασιών στο ρεύμα μεταφοράς, που αναπαράγουν πιστότερα τις εξωτερικές επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Οι χωρικές κατανομές της διασποράς αμμωνίας στο εσωτερικό του κτιρίου σχετίζονται άμεσα από την κατανομή της ροής αέρα στον κτίριο και από την τύρβη που παρουσιάζει, καθώς η τυρβώδη διάχυση εμφανίζεται αρκετά σημαντική σε σχέση με την μοριακή διάχυση, που απαντάται σε απλές στρωτές ροές, και υπολογίζεται από το αρκετά αξιόπιστο κ-ω μοντέλο τύρβης υψηλού αριθμού Re. Ο υπολογισμός των κατανομών αμμωνίας είναι ενδεικτικός και δεν συγκρίνεται με μετρήσεις λόγω έλλειψης αυτών.



Σχήμα 6. Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις προσομοίωσης.

Η σύγκριση μεταξύ αριθμητικών δεδομένων και μετρήσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας συνοψίζεται στο Σχήμα 6 και για τις δύο περιπτώσεις εκτέλεσης. Οι μετρήσεις έχουν ληφθεί σε απόσταση 1.5m από το δάπεδο του κτιρίου από μετρητικά όργανα τοποθετημένα στο κεντρικό διαμήκη άξονα του κτιρίου σε απόσταση 10.1m από το βόρειο και νότιο τοίχο. Το τρίτο κατά σειρά μετρικό σύστημα είναι τοποθετημένο στο μέσο του κεντρικού διαμήκη άξονα, δηλαδή στην θέση $x=25m$. Οι συγκρίσεις θερμοκρασίας για την πρώτη περίπτωση στα τρία σημεία μετρήσεων είναι αρκετά ικανοποιητικές, παρά το γεγονός της θερμοκρασιακής διακύμανσης 6K κατά μήκος της διαμήκου γραμμής, λόγω της διέλευσης του αρθρωτού διάδρομου από το κέντρο σχεδόν του κτιρίου μέχρι την βόρεια έξοδο. Αντίστοιχα ικανοποιητικές κρίνονται και οι συγκρίσεις της σχετικής υγρασίας κατά μήκος της ίδιας γραμμής. Εδώ οι διαφορές αγγίζουν το 6%, συμβάν που οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή συγκέντρωση των υδρατμών που είναι της τάξης $O(-3)$ με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ευαίσθητη στις διακυμάνσεις των τυρβωδών μεγεθών, παρότι απεικονίζεται η μέση χρονική τιμή της βαθμωτής συγκέντρωσης υδρατμών σε πρόβλημα μόνιμης ροής. Η σύγκριση της δεύτερης περίπτωσης δίνει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία. Η καλύτερη ποιότητα των αποτελεσμάτων οφείλεται εν μέρει στην μικρότερη πρωτογενή διακύμανση των μετρούμενων και υπολογισθέντων μεγεθών που ενισχύεται και από την ασθενέστερη συναγωγή των μεταβλητών που εξετάζονται. Γενικά, η σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και διαθέσιμων μετρήσεων κρίνεται επιτυχής, αλλά απαιτούνται περισσότερα σημεία ταυτόχρονης δειγματοληψίας διανυσματικών και βαθμωτών μεγεθών για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων και για τα κινηματικά και τυρβώδη μεγέθη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιλύθηκε ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μόνιμης τυρβώδους ροής με μεταφορά μίγματος νωπού αέρα υδρατμών, αμμωνίας και θερμοκρασίας για ένα υφιστάμενο κτηνοτροφικό

κτίριο, για το οποίο ελήφθησαν μετρητικά δεδομένα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας προς αξιολόγηση του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ανομοιογενή αερισμό για το σύνολο του κτιρίου, λόγω της εξωτερικής διεύθυνσης του ανέμου. Συγχρόνως διαπιστώθηκε ότι ο βαθμός ομοιογένειας αερισμού είναι αντιστρόφως ανάλογος της ισχύος του συναγωγικού ρεύματος. Υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες επιτυγχάνονται σε περιοχές που ο αέρας παγιδεύεται εσωτερικά και δεν έχει εύκολη δίοδο διαφυγής. Τέλος η σύγκριση της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα είναι αρκούντως ικανοποιητική παρά την αδυναμία ολικής αξιολόγησης του αριθμητικού μοντέλου λόγω έλλειψης διανυσματικών κινηματικών δεδομένων και περισσότερων σημείων μέτρησης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barrington, S., Zemanchik, N., Choiniere, Y., 1994. *Orienting livestock shelters to optimize natural summer ventilation*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 37(1), 251-255.
- Bartak, M., Beausoleil-Morrison, I., Clarke, J.A., Denev, J., Drkal, F., Lain, M., Macdonald, I.A., Melikov, A., Popiolek, Z., Stankov, P., 2002. *Integrating CFD and building simulation*. Building and Environment, 37, 865-871.
- Christiaens, J., 1994. *Airflow patterns in animal houses as influenced by wind direction*. In, Vol 1, CIGR, General Secretariat, Merelbeke, Belgium.
- Batchelor, G.K., 1967. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Ferziger, J.H., Peric, M., 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer. London.
- Kelly, T.G., 1983. *An assessment of the influence of some house designs and environmental factors on calf performance*. Ph.D. dissertation, University College Dublin.
- Kettlewell, P.J., Hoxey, R.P., Hampson, C.J., Green, N.R., Veale, B.M., Mitchell, M.A., 2001. *Design and Operation of a Prototype Mechanical Ventilation System for Livestock Transport Vehicles*. Journal of Agricultural Engineering Research, 79(4), 429-439.
- Pedersen, S. & Sällvik, K., 2002. *4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. Heat and moisture production at animal and house levels*. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark
- Lago, A., McGuirk, S.M., Bennett, T.B., Cook, N.B., Nordlund, K.V., 2006. *Calf respiratory disease and pen microenvironments in naturally ventilated calf barns in winter*. Journal of Dairy Science, 89, 4014-4025.
- National Research Council, 2003. *Air emissions from animal feeding operations: current knowledge, future needs*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- Norton, T., Sun, D-W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., 2007. *Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review*. Bioresource Technology, 98(12), 2386-2414.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., Sun, D-W., 2009. *Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics*. Biosystems Engineering, 103, 78-99.
- Tamamidis, P., Assanis, D.N., 1993. *Evaluation of various high order accuracy schemes with and without flux limiters*. Intl. Journal for Numerical Methods in Fluids, 16: 931-948.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. *An introduction to Computational Fluid Dynamics*, Longman, London.
- Wilcox, D.C., 1994. *Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient*. AIAA Journal, 31, 1414-1421.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΤΥΠΙΚΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Θ. Μπαρτζάνας¹, Δ. Φεΐδαρος², Α. Μπαξεβάνου³ και Κ. Κίττας⁴

^{1,2,3,4}Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης Αγρο-Οικοσυστημάτων, 1^η Βιομηχανική Περιοχή, Τ.Κ. 38500 Βόλος

⁴Εργαστήριο Γεωργικών Κατ'ών και Ελέγχου Περ/ντος, Τμήμα Γεωπονίας Φυτ.

Παρ/γής και Αγρ. Περ/ντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Τ.Κ. 38446

E-mail: ¹bartzanas@cereteth.gr, ⁴ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται παραμετρικά μέσω αριθμητικής προσομοίωσης ο μηχανικός αερισμός σε τυπικό τοξωτό θερμοκήπιο, λαμβάνοντας υπόψη την ηλιακή ακτινοβολία και την αντίσταση των φυτών ώστε να παραχθούν πεδία θερμοκρασίας και υγρασίας που αναπτύσσονται εσωτερικά για συγκεκριμένη συνολική παροχή αέρα από αναρροφητήρα σε θερμοκήπιο με σύστημα υγρής παρειάς. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων συμβάλει στον σχεδιασμό διαχείρισης και ελέγχου του εσωτερικού μικροκλίματος του θερμοκηπίου, εξετάζοντας τις κατανομές θερμοκρασίας και υγρασίας. Στοιχεία που σχετίζονται με την προσομοίωση και πιστοποίηση της, λαμβάνονται από μετρήσεις. Κατά την προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη καλλιέργεια ντομάτας ύψους 1.5m και η ρεαλιστική γεωμετρία του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα σχετίζουν το βαθμό επηρεασμού της εξαναγκασμένης συναγωγής στην κατανομή των πεδίων ταχυτήτων αέρα, θερμοκρασίας και υγρασίας, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της άνωσης, λόγω κλίσεων της θερμοκρασίας και την αντίσταση των φυτών στη ροή.

Λέξεις κλειδιά: Εξαναγκασμένη ροή, μηχανικός αερισμός, υγρή παρειά, προσομοίωση.

THREE DIMENSIONAL SIMULATION OF FORCED CONVECTION FLOW IN AN ARCHED GREENHOUSE

T. Bartzanas¹, D. Fidaros², C. Baxevanou³ and C. Kittas⁴

^{1,2,3,4}Centre for Research & Technology-Thessaly, Institute of Technology and Management of Agricultural Ecosystems, 1st Indust. Area, Volos, 38500

⁴Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, N. Ionia, 38446, Volos

E-mail: ¹bartzanas@cereteth.gr, ⁴ckittas@uth.gr

ABSTRACT

In the present work, the effect of fan ventilation in an arc type tunnel greenhouse under the encumbering action of solar radiation and thermal diffusion in terms of temperature comfort and the plant's resistance of the ventilated air flow is investigated numerically and compared to relative experimental data. Inside the greenhouse there is a tomato crop 1.5 m tall. For the simulation's needs a realistic 3D grid is created to figure the geometry of the experiment, and the finite volume method is adopted to treat the fully elliptic partial differential equations' problem. Climatic data provided by the Centre of Research and Technology of Thessaly - Greece were used in order to approach the real experimental conditions. Special issues like the mechanical behaviour of covering material or the aerodynamic behaviour of the rows of tomato crop are also considered.

Key words: Forced convection flow, Fan ventilation, cooling pad, Numerical simulation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πειραματικές και αριθμητικές μελέτες ροής και φαινομένων μεταφοράς εντός τυπικού θερμοκηπίου με ανεμιστήρες-αναρροφητήρες έχουν δείξει ότι οι μεταφερόμενες μάζες και συγκεντρώσεις δεν ακολουθούν αυστηρά την επιμήκη ευθεία διαδρομή από την είσοδο μέχρι την έξοδο απορρόφησης. Αντιθέτως διαγράφουν συνθέτες τροχιές οι οποίες καθορίζονται από μη γραμμικά φαινόμενα, όπως η διαμόρφωση των διατάξεων (στομιών) εισόδου στο θερμοκήπιο, την πτώση πίεσης της εσωτερικής καλλιέργειας, την σύνθετη διαμόρφωση του οριακού στρώματος, την τυρβώδη διάχυση, την μορφή της οροφής και τα χαρακτηριστικά των απορροφητηρών. Η παρουσία των φυτών και του βοηθητικού εξοπλισμού εντός του θερμοκηπίου τροποποιεί το ροϊκό πεδίο και κατά συνέπεια τα μεταφερόμενα μεγέθη, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και ενδεχομένως συγκεντρώσεις τρίτων στοιχείων. Παράλληλα, η ηλιακή ακτινοβολία καθορίζει σημαντικά το μικροκλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Η ποσότητα ενέργειας που μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας καθορίζει τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (φωτοσύνθεση, διαπνοή, κα). Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο, συντελεί στην αισθητή θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου στην διάρκεια της ημέρα, και ελέγχει σε σημαντικό βαθμό την μορφογενετική ανάπτυξη των φυτών. Η εσωτερική κατανομή της θερμοκρασίας και υγρασίας αλλά και δυναμική της ροής εντός του θερμοκηπίου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ιδίως όταν αυτά τα μεγέθη ελέγχονται ή δύναται να ελεγχθούν από μηχανικά μέσα για την διαμόρφωση κατάλληλων συνθηκών με αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας με συνεπαγόμενο οικονομικό κόστος.

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην Μεσογεία έχουν εξαπλωθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες κυρίως λόγω των ήπιων χειμερινών κλιματικών συνθηκών. Όμως, η πρόκληση για τις χώρες σε αυτήν την περιοχή σχετίζονται με τον έλεγχο των θερμών εποχών (Baille, 2001), καθώς η βελτιστοποίηση των καλλιεργειών αυτό του είδους περιορίζεται από τα θερμά και ξερά κλίματα των περιοχών της θερινής περιόδου. Η ψύξη των θερμοκηπίων είναι πολύ δύσκολη και περίπλοκη, αρκετά πιο δύσκολη από την θέρμανση. Ο φυσικός και ο μηχανικά υποβοηθούμενος αερισμός ανήκουν στις κοινές μεθόδους αερισμού που η απόδοσή τους περιορίζεται από την εξωτερική θερμοκρασία (Kittas et al., 1997), ενώ υπάρχει απουσία δεδομένων και μελετών για την σωστή διαστασιολόγηση των συστημάτων αναρρόφησης καθώς η προκαλούμενη πτώση πίεσης από τα φυτά είναι συνάρτηση του είδους, του μεγέθους, του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών καθώς και της εσωτερικής διάταξης τους στο χώρο. Επιπλέον, η υπερδιαστασιολόγηση των συσκευών αυτών καταλήγει σε μη ορθολογική χρήση της ενέργειας και επιπρόσθετα κόστη με τον κίνδυνο της πρόκλησης stress στην καλλιέργεια.

Αντίθετα, η χρήση συστημάτων υγρής παρείας που βασίζεται στην συναγωγή και την συμπύκνωση των υδρατμών, δεσμεύοντας ποσότητες ενθαλπίας από το εσωτερικό της διάταξης, μπορεί να αποτελέσει λύση στην ψύξη αλλά η λειτουργία τους απαιτεί υψηλής καθαρότητας νερό και χρήση ειδικών φίλτρων (Arbel et al., 2003) και παρουσιάζει υψηλό κόστος συντήρησης και κτήσης. Παράλληλα, με την ολοένα αυξανόμενη τάση της μη χρησιμοποίησης παρασιτοκτόνων για περιβαλλοντικούς και οικολογικούς λόγους, επιβάλλεται η χρήση εντομοδικτύων στα ανοίγματα αερισμού των θερμοκηπίων ως λύση για την αντιμετώπιση των εντόμων. Αυτό όμως δυσχεράνει την δυνατότητα φυσικού αερισμού αυξάνοντας την πτώση πίεσης του αέρα από τον εξωτερικό στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Teitel et al., 2005). Στην πραγματικότητα, στη λεκάνη της Μεσογείου η προστασία της καλλιέργειας από τα έντομα είναι περισσότερο σημαντική από την προστασία των υψηλών θερμοκρασιών. Για τους παραπάνω λόγους ο αερισμός με μηχανικά μέσα κερδίζει έδαφος στις χώρες της Μεσογείου. Παρά την μεγάλη σημαντικότητα που έχει ο αερισμός στην λειτουργία, λίγες μόνο εργασίες σχετίζονται με τον

μηχανικό αερισμό και την εξαναγκασμένη συναγωγή (Willits, 2003; Kittas et al., 2005). Επιπλέον, οι εργασίες αυτές εξετάζουν την χωρική κατανομή του εσωτερικού κλίματος του θερμοκηπίου. Η γνώση της αυτής της κατανομής θα οδηγούσε σε ορθότερες εκτιμήσεις της ισχύος των μηχανικών μέσων (ανεμιστήρων) και στον ορθότερο έλεγχο της λειτουργίας τους. Παρότι τα φυσικά πειράματα επιτρέπουν μετρήσεις φυσικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο χωρίς τις παραδοχές των αριθμητικών μοντέλων, μια αναλυτική διερεύνηση θα απαιτούσε χρονοβόρες μετρήσεις και ακριβό εξοπλισμό. Αριθμητικές μέθοδοι, όπως η υπολογιστική ρευστοδυναμική επιτρέπουν την πρόβλεψη βασικών μεγεθών εσωτερικού κλίματος σε αεριζόμενα κτίρια μεταβάλλοντας τις παραμέτρους σχεδιασμού και μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο των πειραμάτων χωρίς βέβαια να παρακάμπτονται πλήρως, εφόσον είναι ουσιαστικά για την πιστοποίηση του αριθμητικού μοντέλου.

2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ & ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σχετικές μετρήσεις διεξήχθησαν σε ένα τοξωτού τύπου γυάλινο θερμοκήπιο εξοπλισμένο με σύστημα υγρής παρείας και αναρροφητήρα, στο αγρόκτημα του Παν. Θεσσαλίας στο Βελεστίνο Μαγνησίας. Το θερμοκήπιο είχε ύψος πλαϊνών τοιχωμάτων 3m, με μέγιστο ύψος 4.65m, συνολικό πλάτος 10.65 και μήκος 30m. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν αφορούσαν την εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του αέρα στο θερμοκήπιο, ενώ τα εξωτερικά κλιματικά δεδομένα καταγράφονταν από το μόνιμα τοποθετημένο μετεωρολογικό σταθμό. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πιστοποίηση του αριθμητικού μοντέλου αντιστοιχούσαν στο διάστημα 6-8 Αυγούστου 2005. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν υγρασιόμετρα (Delta-T devices. VP1), διδιάστατα ηχητικά ανεμόμετρα (Wind sonic Instr) και πυρανόμετρα (Kipp & Zonen. CM-6). Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στο 1Hz και η καταγραφή των μέσων τιμών των δεδομένων γινόταν ανά 1 λεπτό. Η τοποθέτηση των μετρητικών διατάξεων έγινε σε 5 ισαπέχοντα σημεία στον κεντρικό διαμήκη άξονα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.75m από το έδαφος και 25 εκ επάνω από το μέγιστο της καλλιέργειας τομάτας, έτσι ώστε το σημείο 1 να απέχει 5m από την παρεία και το σημείο 5 5m από την έξοδο.

2.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την κατάστρωση του αριθμητικού μοντέλου η ροή μέσα στο θερμοκήπιο θεωρήθηκε μόνιμη, τρισδιάστατη, ασυμπίεστη και τυρβώδης (Ferziger and Peric, 1996). Η μέσης χρονικής στιγμής Navier Stokes κατά Reynolds (RANS) για την εξαρτημένη μεταβλητή Φ είναι:

$$\rho U_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_i \quad (1)$$

Στις εξισώσεις μεταφοράς ενσωματώνονται ως πηγαίοι όροι οι επιδράσεις της φυσικής συναγωγής λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ οροφής και εδάφους, και της ροϊκής αντίστασης των φυτών. Η επίδραση της συναγωγής εισάγεται στις εξισώσεις κίνησης μέσω της υπόθεσης Boussinesq (Batchelor, 1967). με την οποία επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση και ακρίβεια, θεωρώντας σταθερή πυκνότητα σε όλες τις εξισώσεις εκτός από τον υπολογισμό του όρου άνωσης στις εξισώσεις ορμής. Οι πορώδεις όγκοι (φυτά) μοντελοποιούνται με την προσθήκη του όρου S_i στις εξισώσεις κίνησης της ροής. Η συνεισφορά τους συγκεκριμένου ορού διακρίνεται στις ιξώδεις απώλειες κίνησης (σχέση Darcy) και στις αδρανειακές αντιστάσεις.

Για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων σχετικής υγρασίας δηλαδή του νωπού αέρα και των υδρατμών μέσα στο θερμοκήπιο χρησιμοποιείται η προσέγγιση του ιδανικού δυαδικού μίγματος. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος υπολογισμού επιλύει για n-1 στοιχεία του μίγματος και ειδικότερα για τις συγκεντρώσεις υδρατμών. Ο δυαδικός συντελεστής διάχυσης βασίζεται στον νόμο του Fick (λόγω των συγκεντρωσιακών βαθμίδων) και είναι συνάρτηση της τοπικής θερμοκρασίας και πίεσης σύμφωνα με την σχέση Schirmer:

$$D_{i,m} = 2,26 \cdot 10^{-5} \frac{1}{P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (2)$$

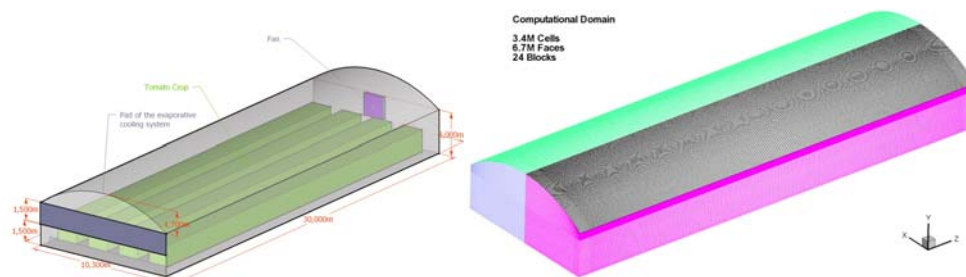
Παράλληλα ο συνολικός συντελεστής διάχυσης για την εξίσωση μεταφοράς των συγκεντρώσεων διορθώνεται με την προσθήκη της τυρβώδους συνεισφοράς λαμβάνοντας υπόψη τον τυρβώδη αριθμό Schmidt Sc_i .

Η διατήρηση της ενέργειας περιγράφεται από την κλασική εξίσωση μεταφοράς της θερμότητας λαμβάνοντας όμως υπόψη την παρουσία των φυτών, μεταβάλλοντας τοπικά τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, και την διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία επιλύεται με το μοντέλο Discrete Ordinates (DO) που προτάθηκε από τους Chui & Raithby (1993) και προστίθεται ως όρος πηγής στην εξίσωση ενέργειας. Συγχρόνως η εκφυλισμένη μορφή της εξίσωσης ενέργειας επιλύεται (τριδιάστατη εξίσωση Fourier) στο εσωτερικό στερεό τμήμα της οροφής. Το μοντέλο DO υποθέτει ότι η ακτινοβολούσα ενέργεια μεταφέρεται εντός ενός μέσου με την ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις συγχρόνως, επιτρέποντας την επίλυση της σε ημιδιαφανείς επιφάνειες, καθιστώντας το σημαντικό όταν χρησιμοποιούνται μέσα (ή επιφάνειες) με μεταβλητό συντελεστή φασματικής απορρόφησης α_λ .

Η επίδραση της τύρβης στην ροή μοντελοποιείται από το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο k-ε υψηλού αριθμού Re (Launder and Spalding 1972). Η καλλιέργεια εντός του θερμοκηπίου λαμβάνει την μορφή τεσσάρων σειρών πορώδους μέσου σύμφωνα με την εξίσωση Forchheimer (Miguel et al., 1997; Bailey et al., 2003), ενώ η εξατμισοδιαπνοή των φυτών δεν επιλύεται στην παρούσα εργασία. Τα δεδομένα για την αδρανειακή και ιξώδη αντίσταση λήφθηκαν από τους Molina-Aiz et al. (2006).

2.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένα δομημένο, καμπυλόγραμμο, πολυτμηματικό πλέγμα για αποδώσει ρεαλιστικά την γεωμετρία του θερμοκηπίου και οι υπολογισμοί έγιναν με τον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent. Οι εξισώσεις διατήρησης της συνέχειας, της ορμής, της ενέργειας, της μεταφοράς της τύρβης και των συγκεντρώσεων υδρατμών επιλύθηκαν αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων σε ένα πλέγμα 3.4 εκατομμυρίων εξαεδρικών κελιών και 24 τμημάτων μετά από δομικές ανεξαρτησίας πλέγματος. Η γεωμετρία του φυσικού προβλήματος και το είδος των συνοριακών συνθηκών δίνονται στο Σχήμα 1. Ο αλγόριθμος SIMPLEC (Versteeg & Malalasekera, 1995) χρησιμοποιήθηκε για την σύζευξη πίεσης-ορμής, ενώ το σχήμα διακριτοποίησης για τους όρους συναγωγής ήταν το ανάντη δευτέρας τάξης SOU (Tamamidis and Assanis, 1993) και για τους όρους διάχυσης, το σχήμα κεντρικής διαφορίσης. Το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης ορίστηκε ίσο με 10^{-6} για όλες τις εξισώσεις και η τυπική διάρκεια εκτέλεσης άγγιξε τις 30 ώρες σε τετραπύρηνο υπολογιστή Pentium IV, Quad-core QX9850 Extreme Edition.



Σχήμα 1. Φυσικό πρόβλημα (αριστερά) και πλέγμα υπολογιστικού πεδίου (δεξιά).

2.4. ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ο αέρας εισέρχεται στο υπολογιστικό πεδίο από την επιφάνεια που αντιστοιχεί στην υγρή παρειά συνολικής έκτασης 15m^2 . Η παροχή εισόδου διαμορφώνεται από σύστημα αναρρόφησης αέρα τοποθετημένο στην απέναντι πλευρά της παρειάς ίση με 30000 και 35000 m^3 . Στην επιφάνεια εξόδου από το υπολογιστικό πεδίο εφαρμόζεται συνθήκη αναρρόφησης που να ανταποκρίνεται στην παροχή εισόδου, όταν τα πλαϊνά ανοίγματα είναι κλειστά. Παράλληλα, όλοι οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται αδιαπέραστοι και αδιαβατικοί, ενώ η οροφή ορίζεται ως ημιπερατή με μικτή θερμική (ακτινοβολία & συναγωγή) οριακή συνθήκη (Fidasos et al., 2008). Οι οπτικές ιδιότητες των υλικών της οροφής εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και είναι αντίστοιχες με αυτές ενός λεπτοπάχου γυαλιού. Η τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας λήφθηκε από τις μετρήσεις ενώ η εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού πλησίαζε τους 36°C και η σχετική υγρασία του αέρα ήταν 45%.

Το αριθμητικό μοντέλο επιλύεται αρχικά για παροχή υγρής παρειάς $0.55\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και για χρόνο που αντιστοιχεί στις 10:00 τοπική ώρα, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα του με τις μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την ίδια ώρα της 6^{ης} Αυγούστου 2005 και στην συνέχεια δοκιμάζεται σε παροχή $35000\text{m}^3/\text{hr}$. Η εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού μετά την υγρή παρειά ήταν 27°C και το κλάσμα μάζας των υδρατμών ίσο με $9.556\text{E}-03$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό σχετικής υγρασίας 42.6%.

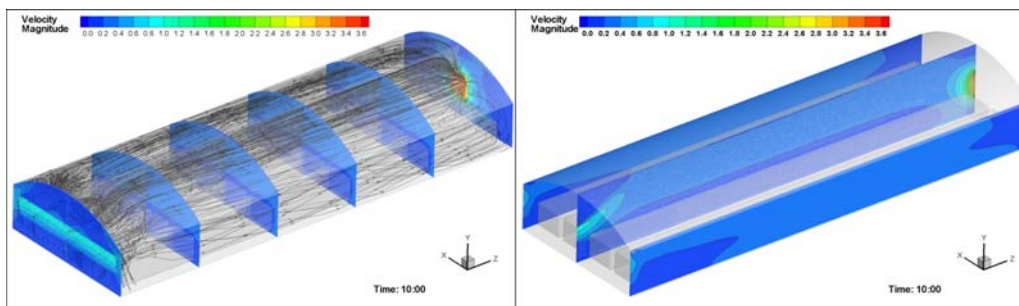
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των μετρηθέντων μεγεθών για τα 5 εσωτερικά επιλεγμένα σημεία στο θερμοκήπιο. Τα δεδομένα παρουσιάζουν τις μέσες τιμές των μεγεθών μισή ώρα πριν και μετά τις 10:00 για να επιτευχθεί μια κοινή βάση σύγκρισης με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Η θερμοκρασία διαγράφει σχεδόν γραμμική αύξηση, αφήνοντας το θερμοκήπιο με 2°C λιγότερους από την εξωτερική θερμοκρασία, ενώ η σχετική υγρασία ακολουθεί αναμενόμενα αντίθετη πορεία καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, ενώ η ολική πίεση παραμένει ανεπηρέαστη.

Πίνακας 1. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μετρηθέντων μεγεθών (εσωτερική θερμοκρασία, σχετική υγρασία και μέτρο ταχύτητας) για την χρονική περίοδο από 9:30 έως 10:30 της 6^{ης} Αυγούστου 2005.

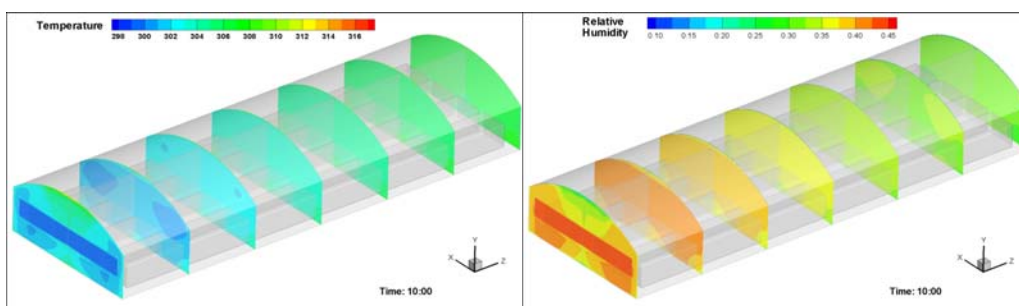
Σημείο Μέτρησης	Θερμοκρασία[K]		Σχετική Υγρασία [%]		Μέτρο Ταχύτητας [m/s]	
	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
1	301.61	1.317	41.21	1.305	0.411	0.012
2	302.53	1.328	38.15	1.314	0.381	0.019
3	303.08	1.949	37.53	2.414	0.375	0.015
4	305.12	2.067	35.02	2.713	0.350	0.021
5	306.35	2.200	33.14	2.769	0.331	0.031

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι εγκάρσιες και διαμήκεις κατανομές της ταχύτητας αέρα και των 3Δ γραμμών ροής, όπως προκύπτουν από την κατανομή της εσωτερικής ροής. Ο κύριος όγκος αυτής μεταφέρεται πάνω από την περιοχή κάλυψης των φυτών, ενώ εντός αυτών η ροή πεδεύεται ισχυρά. Η ροή παρουσιάζει σχεδόν ενιαίο μέτρο της ταχύτητα στο μεγαλύτερο μήκος του θερμοκηπίου ενώ επιταχύνεται για να διαφύγει στο εξωτερικό περιβάλλον κοντά στον μηχανικό αναροφητήρα. Η μέγιστη ταχύτητα δεν ξεπερνά τα 3.6m/s στην περιοχή ισχυρής αναρρόφησης, ενώ στο κύριο πυρήνα της ροής η ταχύτητα διατηρείται στα 0.4 m/s όπως προκύπτει από τα Σχήματα 2&5.

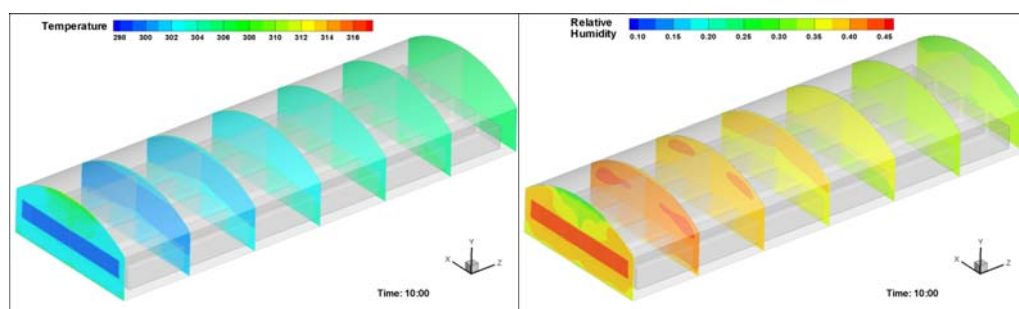


Σχήμα 2. Εγκάρσιες (αριστερά) και διαμήκεις (δεξιά) τομές του υπολογιστικού πεδίου κατανομών μέτρου ταχύτητας αέρα για την 10^η πρωινή ώρα της 6^{ης} Αυγούστου 2005.

Στα Σχήματα 3&4 απεικονίζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για παροχές αέρα 30000 και 35000 m³/hr, όπου διακρίνονται οι θερμικές και συγκεντρωσιακές βαθμίδες στην διαμήκη διεύθυνση του θερμοκηπίου λόγω του σχήματος του. Οι τομές με τις κατανομές της θερμοκρασίας εμφανίζουν υψηλότερες τιμές σε περιοχές πάνω από την καλλιέργεια ενώ η ακριβώς αντίθετη εικόνα προβάλλεται για την σχετική υγρασία. Παράλληλα, λόγω της μηχανικά υποβοηθούμενης συναγωγής οι θερμοκρασιακές διαφορές φυτών και αέρα μειώνονται και οι κλίσεις στις διεπιφάνειες αυτών μηδενίζονται, αποδίδοντας μια ενιαία κατανομή θερμοκρασίας με χαμηλότερες τιμές εντός της καλλιέργειας και υψηλότερες τιμές στις περιοχές άνωθεν αυτής καθώς αυτές εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

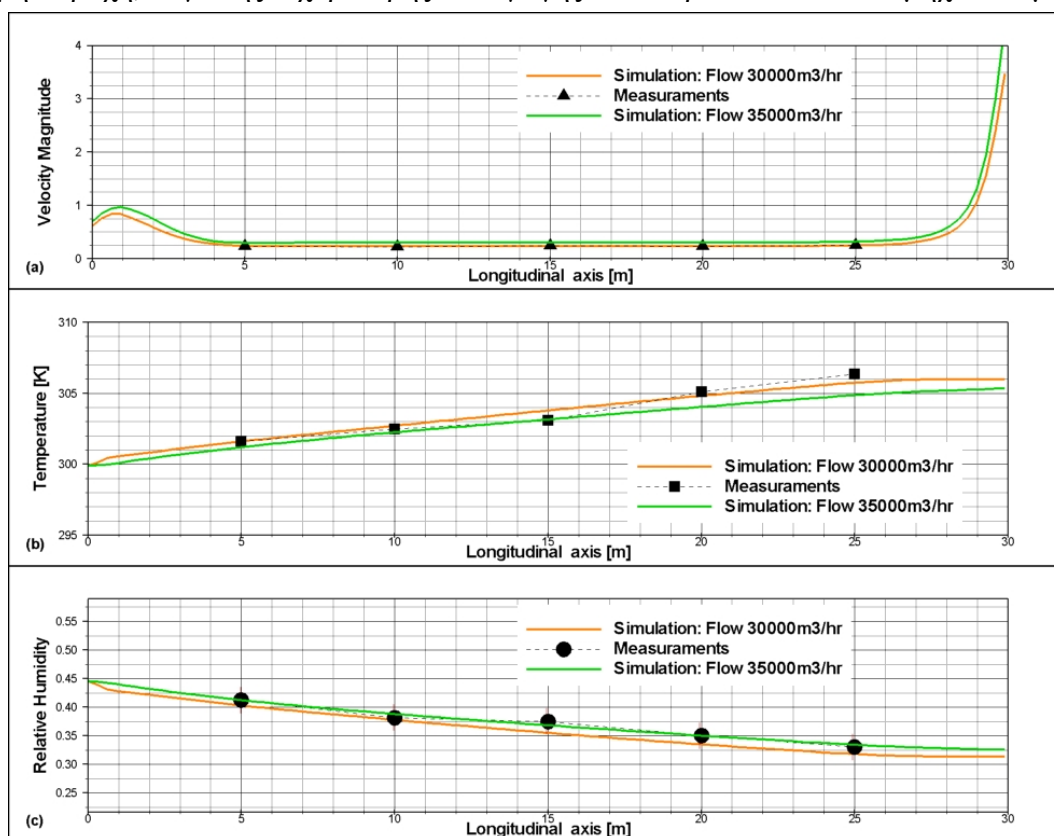


Σχήμα 3. Εγκάρσιες τομές της θερμοκρασίας (αριστερά) και της σχετικής υγρασίας (δεξιά) για την περίπτωση παροχής 30000 m³/hr.



Σχήμα 4. Εγκάρσιες τομές της θερμοκρασίας (αριστερά) και της σχετικής υγρασίας (δεξιά) για την περίπτωση παροχής 35000 m³/hr.

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει συγκρίσεις των πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων για τα είδη παροχής αέρα επί της νοητής γραμμής που ανήκει στο κεντρικό επίπεδο του θερμοκηπίου 25 πάνω από την καλλιέργεια. Οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των μετρήσεων και των δεδομένων για την παροχή 30000 m³/hr είναι αρκετά μικρές (<2%) ενισχύοντας σημαντικά την εγκυρότητα του αριθμητικού μοντέλου. Μικρές διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία οφείλονται στη μη θεώρηση της εξατμισοδιαπνοής των φυτών, που οδηγεί στην υποεκτίμηση της θερμοκρασίας και την υπερεκτίμηση της σχετικής υγρασίας. Σε κάθε περίπτωση οι διαφορές λάθους δεν ξεπερνούν το 3.5%. Οι διαφορές που ανακύπτουν μεταξύ των δύο ογκομετρικών παροχών για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία δίνουν χαμηλότερη κατά 1°C και υψηλότερη κατά 4.5% στην έξοδο του θερμοκηπίου για την μεγαλύτερη παροχή, λόγω της ισχυρότερης συναγωγής που επιβάλλεται από τα μηχανικά μέσα.



Σχήμα 5. Σύγκριση για τα μεγέθη της ταχύτητας, εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας μεταξύ αριθμητικής προσομοίωσης (συνεχής γραμμή) και μετρήσεων (μαύρα σημεία και διακεκομμένη γραμμή) στα 5 εσωτερικά σημεία δειγματοληψίας για την 10^η πρωινή τοπική ώρα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση ενεργητικού συστήματος ψύξης υγρής παρειάς. Η επίδραση μηχανικού αερισμού με ψύξης υγρής παρειάς στις κατανομές ταχυτήτων αέρα και θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατέδειξε τις δυνατότητες του υπολογιστικού εργαλείου για την βελτίωση της απόδοσης ανάλογων συστημάτων σε θερμοκήπια. Το επιμήκης σχήμα του θερμοκηπίου βοηθά στον σχηματισμό θερμικών και συγκεντρωσιακών κλίσεων κατά μήκος αυτού με σχεδόν ενιαία κατανομή στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Η βελτίωση του παρόντος μοντέλου με την προσθήκη της εξατμισοδιαπνοής θα βοηθήσει την μελέτη για αποδοτικότερα συστήματα υγρής παρειάς και τον ορθολογικό σχεδιασμό θερμοκηπίων. Επιπλέον θα αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για την ομοιο-

γένεια συνθηκών εντός της καλλιέργειας και ασφαλώς μεταξύ της παρειάς εισόδου και του αναρροφητήρα.

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*. Transactions of the 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. Journal 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.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΝΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ

Δ. Φεΐδαρος¹, Κ. Μπαξεβάνου², Θ. Μπαρτζάνας³ και Κ. Κίττας⁴

^{1,2,3,4}Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης Αγρο-Οικοσυστημάτων, 1^η Βιομηχανική Περιοχή, Τ.Κ. 38500 Βόλος

⁴Εργαστήριο Γεωργικών Κατ'ών και Ελέγχου Περ/ντος, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτ. Παρ/γής και Αγρ. Περ/ντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Τ.Κ. 38446

E-mails: ¹dfeid@cereteth.gr, ⁴ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη ερευνάται η μεταβολή του θερμικού φορτίου ενός τυπικού δωματίου εξοπλισμένου με φυτεμένο δώμα με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Στο αστικό περιβάλλον τα ψυκτικά φορτία κτιρίων επιβαρύνουν το περιβάλλον, μέσω της δέσμευσης πόρων για την παραγωγή ενέργειας, μέσω των εκπομπών που την συνοδεύουν από ορυκτά καύσιμα και τέλος μέσω της επίδρασης στο αστικό μικροκλίμα από την αποβάλλουσα θερμότητα των εξωτερικών κλιματιστικών μονάδων. Μια ενδεδειγμένη μέθοδος για την μείωση των ψυκτικών φορτίων κτιρίων είναι η φύτευση της οροφής προκειμένου να ενισχυθεί η θερμομόνωση του και να μεταβληθεί το περιβάλλον μικροκλίμα του κτιρίου. Η επίδραση των ταρτσόκηπων στο εσωτερικό κλίμα των κτιρίων έχει μελετηθεί στο παρελθόν κυρίως με αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους, ενώ πολύ λίγες εργασίες έχουν δημοσιευθεί με αριθμητικά αποτελέσματα μελετών απόδοσης ταρτσόκηπου.

Λέξεις κλειδιά: Ταρτσόκηποι, Θερμικά & Ψυκτικά φορτία, προσομοίωση ακτινοβολίας, εξοικονόμηση ενέργειας.

NUMERICAL SIMULATION OF AN EMPTY ROOM THERMAL BEHAVIOUR WITH GREEN ROOF

D.Fidaros¹, C.Baxevanou², T.Bartzanas³ and C.Kittas⁴

^{1,2,3,4}Centre for Research and Technology-Thessaly, Institute of Technology and Management of Agricultural ecosystems, 1st Industrial Area, Volos, 38500

²Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, N. Ionia, 38446, Magnisia

E-mails: ¹dfeid@cereteth.gr, ⁴ckittas@uth.gr

ABSTRACT

In the present study the variation of the solar thermal gain in a typical room equipped with planted roof using CFD techniques is investigated. Buildings cooling loads aggravate the urban environment through the exhaustion of natural resources spent for the electrical power production, the emissions accompanying the power production process by conventional fossil fuels and finally through the thermal emissions to the building surroundings by the outer split unit of an AC system. A method to reduce the cooling needs of a building is the planting of the roof in order to reduce the energy demands for heating and cooling by advancing the local microclimate over and around the building through the plants' presence. The influence of green roofs in interior climate of buildings has been studied mainly with analytical and experimental methods, while a small number of them are dedicated to numerical methods presenting results about the energy performance of an installed green roof over a building's roof.

Key words: Green roofs, Heating & Cooling loads, solar radiation simulation, energy saving.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται ένα δωμάτιο με παράθυρο στο Νότο και δύο ελεύθερους τοίχους στους οποίους είναι γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η εξωτερική θερμοκρασία. Οι άλλοι δύο τοίχοι καθώς και το πάτωμα θεωρείται ότι συνορεύουν με κλιματιζόμενους χώρους με συνέπεια να επιβάλλονται ισοθερμοκρασιακές οριακές συνθήκες. Για την οροφή θεωρείται γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η θερμοκρασία. Η προσομοίωση αφορά την φθινοπωρινή ισημερία σε γεωγραφικό πλάτος που αντιστοιχεί στην Κεντρική Ελλάδα (Λάρισα). Προσομοιώνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, η ταράτσα θεωρείται γυμνή ενώ στην άλλη θεωρείται καλυμμένη με φυτά. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή κατανομών θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα εντός του δωματίου σε τομές και με τη μορφή του συνολικού θερμικού κέρδους του δωματίου, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα της οικονομικής αξιολόγησης και αποδοτικότητας της επένδυσης.

Δεδομένου ότι η φύτευση επιβαρύνει με κόστος τον κατασκευαστή είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το ακριβές κέρδος που μπορεί να προκύψει από μια τέτοια επέμβαση καθώς και τη μεταβολή που θα επιφέρει στην κατανομή της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο. Μέχρι στιγμής το ζήτημα των ταρατσόκηπων έχει αντιμετωπιστεί κυρίως σε επίπεδο αρχιτεκτόνων, πολιτικών μηχανικών και λιγότερο γεωπόνων. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατασκευή ενός μοντέλου στο οποίο θα είναι δυνατή η μεταβολή των θερμικών και οπτικών χαρακτηριστικών του δομικού στοιχείου προκειμένου να είναι εύκολη η διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις βελτιώσεις που μπορεί να προκύψουν από διαφορετικές αρχιτεκτονικές λύσεις καθώς και από διαφορετικές εφαρμογές φύτευσης. Η ποσοτικοποίηση του κέρδους θα επιτρέψει στον μελετητή της κατοικίας να βελτιστοποιήσει τη μελέτη του.

Η επίδραση των ταρατσόκηπων στο εσωτερικό κλίμα των κτιρίων έχει μελετηθεί στο παρελθόν κυρίως με αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους (Santamouris *et al.*, 2007). Πολύ λίγες είναι οι δημοσιευμένες αριθμητικές εργασίες που προσομοιώνουν τα φαινόμενα μεταφοράς σε χώρους που καλύπτονται από ταρατσόκηπους (Eumorfoulou *et al.*, 1995). Στην πρώτη μελετάται πειραματικά η ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση ενός συστήματος ταρατσόκηπου τοποθετημένου πάνω σε νηπιαγωγείο και το ενεργειακό κέρδος υπολογίζεται με το πρόγραμμα TRNSYS. Μια παρόμοια εργασία παρουσιάζεται (Lazzarin *et al.*, 1998) για έναν ταρατσόκηπο εγκατεστημένο σε νοσοκομείο. Στις εργασίες των (Lazzarin *et al.*, 1998; Palomo del Barrio, 1998) παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την πραγματική δυναμική συμπεριφορά ενός ταρατσόκηπου, ενώ σε ακόλουθη (Theodosiou, 2003) αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο κατάλληλο για τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς υπαρχουσών κατασκευών για φυτεμένες ταράτσες. Ένα σημαντικό πρόβλημα μοντελοποίησης της απόδοσης ενός ταρατσόκηπου είναι η έλλειψη στοιχείων που αφορούν τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών στην περιοχή της ορατής και της θερμικής ακτινοβολίας. Έτσι μια σειρά εργασιών έχουν παρουσιαστεί στις οποίες εξετάζεται το πρόβλημα του προσδιορισμού των ιδιοτήτων αυτών (Niachou *et al.*, 2001; Ondinu & Murase, 2007).

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα φαινόμενα ροής από τις εξίσωσεις Navier-Stokes και η μεταφορά θερμότητας από την εξίσωση ενέργειας. Η επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους εξωτερικούς τοίχους-παράθυρα και την οροφή, καθώς και η εκπεμπόμενη από τα υλικά ακτινοβολία προσομοιώνονται με το μοντέλο ακτινοβολίας Discrete Ordinates. Η ροή εντός του δωματίου είναι τυρβώδης, ενώ το φαινόμενο της θερμικής άνωσης αντιμετωπίζεται με την προσέγγιση Boussinesq.

Χρησιμοποιείται πηγαίος κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στον οποίο έχουν ενσωματωθεί απαιτούμενα υπομοντέλα, που αφορούν την μετάδοση θερμότητας

και τις οριακές συνθήκες. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων σε τρισδιάστατο πλέγμα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η ροή εντός του δωματίου θεωρείται 3Δ, μη-μόνιμη ασυμπίεστη και τυρβώδης. Στην παρούσα εργασία τα φαινόμενα μεταφοράς ροής και θερμότητας περιγράφονται από τις Navier-Stokes εξισώσεις (Launder & Spalding, 1974; Ferziger & Peric, 1996) Εντός των στερών ορίων επιλύεται η εξίσωση Fourier η οποία αποτελεί την εκφυλισμένη μορφή της γενικευμένης εξίσωσης ενέργειας.

Η επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους εξωτερικούς τοίχους-παράθυρα και την οροφή, η εκπεμπόμενη από τα υλικά ακτινοβολία καθώς και η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο προσομοιώνονται με το μοντέλο DO (Raithby & Chui, 1990; Chui & Raithby, 1993; Raithby, 1999; Kim & Huh, 2000). Σε αυτό το μοντέλο η ακτινοβολία θεωρείται ότι μεταφέρεται διαμέσου του υλικού ισοταχώς ταυτόχρονα προς όλες τις κατευθύνσεις. Το μοντέλο DO επιτρέπει την επίλυση της ακτινοβολίας σε ημι-διαφανείς τοίχους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μοντελοποίηση όπου οι οπτικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Έτσι είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί με υλικά στα οποία ο φασματικός συντελεστής απορρόφησης α_λ διαφοροποιείται βηματικά συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

Η ροή εντός του δωματίου είναι τυρβώδης και μοντελοποιείται με το k- ω μοντέλο τύρβης υψηλού αριθμού Re (Wilcox, 1994) με συναρτήσεις τοίχου. Το φαινόμενο της θερμικής άνωσης αντιμετωπίζεται με την προσέγγιση Boussinesq. Η χρήση του μοντέλου προσφέρει ταχύτερη σύγκλιση καθώς λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της πυκνότητας λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας μόνο κατά τον υπολογισμό του όρου πηγής f_b της εξίσωσης μεταφοράς ορμής ενώ οπουδήποτε αλλού θεωρεί την πυκνότητα σταθερή. Συγκεκριμένα προσεγγίζει την πυκνότητα από τη σχέση $\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$ (4)

Όπου β ο συντελεστής θερμικής διαστολής και T η θερμοκρασία με αποτέλεσμα ο όρος πηγής να υπολογίζεται από τη σχέση $f_b = (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g$ (5)

2.2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Οι εξισώσεις μεταφοράς επιλύθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Εξετάστηκαν δύο πλέγματα ένα των 375700 κελιών και ένα των 841500 κελιών προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων και λύσεων από το μέγεθος της υπολογιστικής διαφοροποίησης. Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόστηκαν πρακτικές πύκνωσης του πλέγματος κοντά στα στερεά όρια προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή των συναρτήσεων τοίχου που απαιτεί το μοντέλο τύρβης. Για τη σύζευξη των ταχυτήτων με την πίεση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLEC. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς της ορμής έγινε με το σχήμα QUICK, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και της ακτινοβολίας στο μοντέλο DO έγινε μέσω του σχήματος SOU, ενώ στην εξίσωση μεταφοράς του ειδικού ρυθμού σκέδασης χρησιμοποιήθηκε πρώτης τάξης ανάντη σχήμα, και της ενέργειας με το τρίτης τάξης σχήμα MUSCL. Τέλος οι όροι διάχυσης όλων των εξισώσεων μεταφοράς διαφοροποιήθηκαν με το σχήμα των κεντρικών διαφορών. Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της μη-μόνιμης συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής ημέρας ήταν $dt=60\text{sec}$, και πραγματοποιήθηκαν 720 βήματα προκειμένου να καλυφθεί η χρονική διάρκεια των 12 ωρών της ισημερίας. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε 10^{-4} για

όλες τις μεταβλητές εκτός της ενέργειας για την οποία τέθηκε 10^{-6} . Για το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν δύο φάσματα μήκους κύματος, που αντιστοιχούν στην ορατή και την υπέρυθη ακτινοβολία ($\lambda=0-1.1 \mu\text{m}$ και $\lambda=1.1-100\mu\text{m}$).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται δωμάτιο μεγέθους $3 \times 4 \times 3 \text{ m}$ με ένα παράθυρο στην Ανατολή μεγέθους $1 \times 1 \text{ m}$, μια πόρτα στο Νότο 1.5×2.2 και δύο ελεύθερους τοίχους πάχους 20 cm (Ανατολή και Νότος) στους οποίους είναι γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η εξωτερική θερμοκρασία. Οι άλλοι δύο τοίχοι καθώς και το πάτωμα θεωρείται ότι συνορεύουν με κλιματιζόμενους χώρους και συνεπώς επιβάλλονται ισοθερμοκρασιακές οριακές συνθήκες. Για την οροφή λαμβάνεται ως γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η θερμοκρασία και το πάχος της λαμβάνεται 30 cm .

3.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ο αέρας εντός του δωματίου θεωρείται ότι έχει τις ακόλουθες θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες: $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$, $C_p = 1005 \text{ J/KgK}$, $k = 0.0253 \text{ W/mK}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/ms}$, $\alpha = 0 [1/\text{m}]$, $\beta = 0.00343 [1/\text{K}]$ και $n = 1$. Η πόρτα και το παράθυρο θεωρούνται γυάλινες επιφάνειες με τις ακόλουθες θερμικές ιδιότητες $k_{\text{eff}} = 19.5 \text{ W/mK}$, $\rho_{\text{av}} = 184.6 \text{ Kg/m}^3$, $C_{p,\text{eff}} = 23 \text{ J/kgK}$, ενώ οι οπτικές ιδιότητες δίνονται από τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Οπτικές ιδιότητες γυάλινων επιφανειών

Υλικό	PAR	NIR
a (Απορροφητικότητα)	0.10	0.20
τ (Περατότητα)	0.84	0.73
ρ (Ανακλαστικότητα)	0.06	0.07
n (Δείκτης διάθλασης)	1.65	1.72
Πάχος [mm]	4.00	4.00

Οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται ότι είναι δρομικοί με την ακόλουθη σύσταση και θερμοφυσικές ιδιότητες.

Πίνακας 2. Στρώσεις και ιδιότητες δρομικού τοίχου

a/a	Στρώμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [kcal/mhC]	C_p [kJ/Kg]
1	Επίχρισμα	0.02	1900	0.750	0.84
2	Τούβλο	0.09	1200	0.450	0.80
3	Μόνωση	0.05	18	0.035	1.60
4	Τούβλο	0.09	1200	0.450	0.80
5	Επίχρισμα	0.02	1900	0.750	0.84

Ο συντελεστής εκπομπής λαμβάνεται $\varepsilon=0.93$ ενώ ο συντελεστής αντανάκλασης $\rho=0.4$. Για λόγους υπολογιστικής οικονομίας δεν αναγνωρίζονται τα ξεχωριστά στρώματα υλικών και συνεπώς χρησιμοποιούνται τιμές θερμικών ιδιοτήτων που αντιστοιχούν στις δρώσες τιμές του παραπάνω συνόλου. Η οροφή αντίστοιχα αποτελείται από την ακόλουθη σύσταση.

Πίνακας 3. Στρώσεις και ιδιότητες απλής οροφής

α/α	Στρώμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [W/mk]	Cp [J/KgK]
1	Επίχρισμα	0.02	1900	0.87	840
2	Μπετό	0.30	1000	0.38	900
3	Μόνωση	0.05	35	0.06	900
4	Στεγάνωση	0.01	1200	0.17	1470
5	Κάλυψη	0.03	1600	0.7	880

Για την περίπτωση που είναι καλυμμένη με άσφαλτο και χαλίκι λαμβάνεται $\varepsilon=0.87$ και $\rho=0.13$ και ομοίως αντιμετωπίζεται ως ενιαίο υλικό.

Τέλος στην περίπτωση που η οροφή θεωρείται ταρατσόκηπος θεωρείται ότι αποτελείται από την ακόλουθη σύσταση (Theodosiou, 2003). Τα φυτά θεωρείται ότι έχουν $\varepsilon=0.7$ και $\rho=0.23$.

Πίνακας 4. Στρώσεις και ιδιότητες φυτεμένης οροφής

α/α	Υπόστρωμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [W/m·k]	Cp [J/Kg·K]
1	Greenery (sedum)	0.1	500	0.115	1380
2	Soil (για υγρό χώμα)	0.067	766	1	1000
3	Filter sheet				
4	Drainage layer (polythelene)	0.108	25	0.15	1200
5	Retention sheet				
6	Anti-root barrier				
7	Water proof sheet	0.01	1200	0.17	1470
8	Μπετόν	0.30	1000	0.38	900
9	Επίχρισμα	0.02	1900	0.87	840

3.3. ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το δάπεδο, ο βόρειος και δυτικός τοίχος του δωματίου θεωρούνται ισόθερμοι τοίχοι, χωρίς πάχος. Σε ότι αφορά την ακτινοβολία θεωρούνται αδιαφανείς επιφάνειες οι οποίες μπορούν να απορροφήσουν μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, να ανακλάσουν την υπόλοιπη και να εκπέμψουν ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Η θερμοκρασία τους θεωρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και ίση με 20 °C.

Η πόρτα και το παράθυρο θεωρούνται ότι αποτελούνται εξωτερικά από δύο συζευγμένους ημι-διαφανείς τοίχους και εσωτερικά από στερεό με τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες που έχουν περιγραφεί. Εξωτερικά εφαρμόζεται μικτή θερμική οριακή συνθήκη που σημαίνει ότι η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με συνδυασμό συναγωγής και ακτινοβολίας. Ο συντελεστής συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα λαμβάνεται ίσος με $\alpha=7.1$ W/mk., ενώ για την ακτινοβολία θεωρούνται ημι-διαφανείς επιφάνειες. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται ενώ το υπόλοιπο διαπερνά την επιφάνεια. Η απορρόφηση της διερχόμενης ακτινοβολίας γίνεται από το στερεό που θεωρείται ότι καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των δύο ημι-διαφανών τοίχων. Μέσα στο στερεό επιλύονται οι εξισώσεις ενέργειας και ακτινοβολίας, αλλά όχι οι εξισώσεις ορμής και τύρβης. Οι δύο ημιδιαφανείς τοίχοι και το εσωτερικό είναι συζευγμένα με αποτέλεσμα οι τιμές των επιλυόμενων παραμέτρων να μεταφέρονται από τη μία επιφάνεια στην άλλη. Η μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας δίνεται στο σχήμα 2, ενώ η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο σχήμα 3 και θεωρείται ότι βρίσκεται όλη στο πρώτο φάσμα της επιλυόμενης ακτινοβολίας.

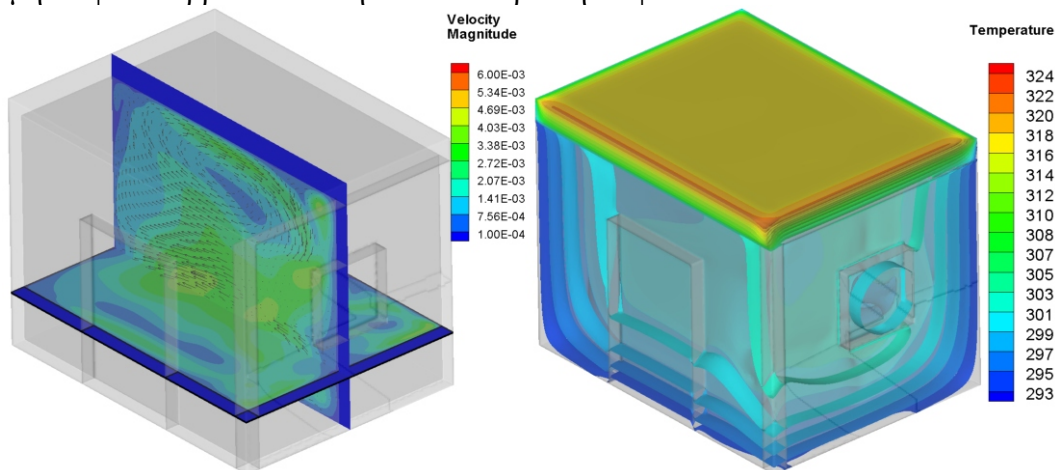
Οι τοίχοι καθώς και η οροφή επίσης θεωρούνται ότι αποτελούνται από δύο εξωτερικούς ημι-διαφανείς τοίχους και εσωτερικά από ένα στερεό το οποίο έχει τέτοιες

οπτικές ιδιότητες (συντελεστή απορρόφησης) που να εξασφαλίζει ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία θα έχει πλήρως απορροφηθεί στα πρώτα υπολογιστικά κελιά. Με αυτό τον τρόπο όμως εξασφαλίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας του τοίχου λόγω ακτινοβολίας, η δυνατότητα να μελετηθεί η θερμοαποθήκευση καθώς και να ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία υπέρυθρης ακτινοβολίας από τον τοίχο προς το εσωτερικό.

Η προσομοίωση αφορά την 21^η Σεπτεμβρίου σε γεωγραφικό πλάτος που αντιστοιχεί στην Κεντρική Ελλάδα (γεωγραφικό πλάτος $L=22.57$, γεωγραφικό μήκος $\phi=39.22$ και $GT=+2h$). Προσομοιώνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ταράτσα θεωρείται γυμνή ενώ στην άλλη θεωρείται καλυμμένη με φυτά.

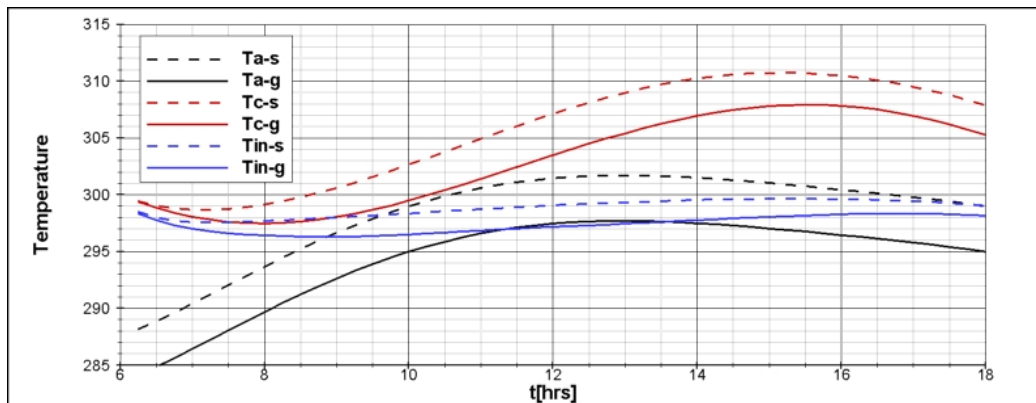
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σχήμα 1 δίνονται σε δύο τομές, η κατανομή και τα διανύσματα ταχυτήτων καθώς και η κατανομή θερμοκρασίας στις 12 το μεσημέρι για την περίπτωση της φυτεμένης οροφής. Παρατηρείται ισχυρά τυρβώδης ροή με ανακυκλοφορίες κοντά στην οροφή όπου οι θερμοκρασιακές κλίσεις είναι πιο έντονες, ενώ οι μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζονται στο κέντρο του δωματίου. Η παρούσα περίπτωση δεν μπορεί να συγκριθεί με τις συνήθεις περιπτώσεις ροής σε κλειστές κοιλότητες δεδομένου ότι η θερμή επιφάνεια βρίσκεται στην άνω συνοριακή επιφάνεια.



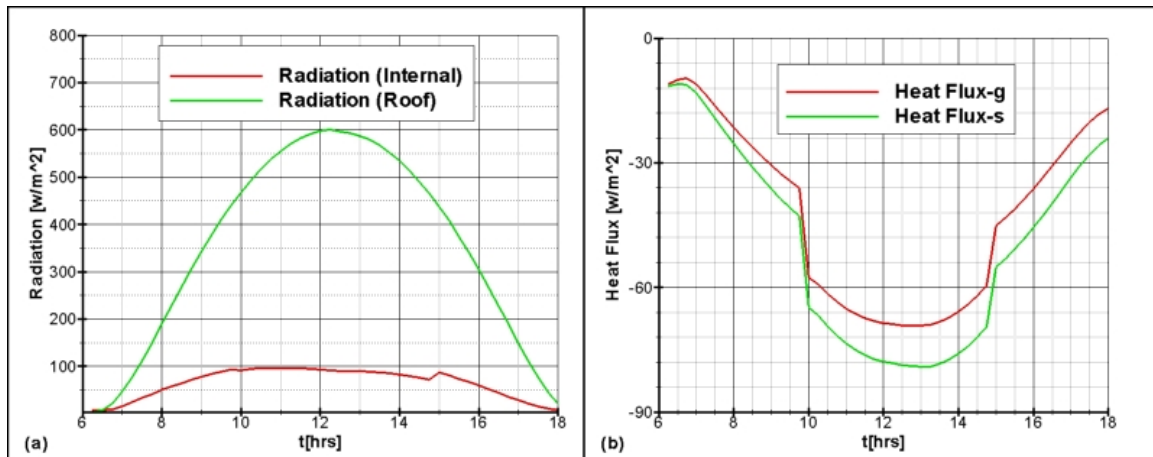
Σχήμα 1. Κατανομή ταχυτήτων και θερμοκρασίας στις 12h.

Στο σχήμα 2 δίνονται οι καμπύλες χρονικής μεταβολής των μέσων θερμοκρασιών του εξωτερικού περιβάλλοντος (T_a), της οροφής (T_c) και του εσωτερικού χώρου (T_{in}) και για τις δύο περιπτώσεις, της απλής οροφής (s) με διακεκομμένη γραμμή και της φυτεμένης (g) με συνεχή γραμμή.



Σχήμα 2. Χρονική μεταβολή μέσων θερμοκρασιών: α) Εξωτερικού περιβάλλοντος (T_a), β) Οροφής (T_c) και γ) εσωτερικού χώρου (T_{in}), για την περίπτωση της απλής οροφής (s) και της φυτεμένης (g)

Με δεδομένο ότι η αρχική θερμοκρασία του υπολογιστικού χώρου θεωρήθηκε ίση με 300 K, η αρχική θερμοκρασία της οροφής και του εσωτερικού μειώνεται μέχρι περίπου τις 9h. Στην συνέχεια αρχίζει να αυξάνει λόγω κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας και δευτερευόντως λόγω της αύξησης της εξωτερικής θερμοκρασίας για να μειωθεί ξανά τις απογευματινές ώρες. Η μείωση γίνεται με βραδύτερους ρυθμούς ενώ η μέγιστη τιμή μετατοπίζεται προς το απόγευμα λόγω της θερμοαποθήκευσης. Στο εσωτερικό της οροφής, η θερμοκρασία αυξάνεται πολύ περισσότερο από ότι στον εσωτερικό αέρα και η διαφοροποίηση ανάμεσα στους δύο τύπους οροφών είναι πολύ πιο έντονη.



Σχήμα 3. Χρονική μεταβολή (α) της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό και το εσωτερικό του δωματίου και (β) της θερμοροής για την απλή (s) και φυτεμένη (g) οροφή.

Λόγω του ανατολικού παραθύρου το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται κατά τις πρωινές ώρες παραμένοντας όμως σε ικανοποιητικά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στο σχήμα 3b δίνεται η χρονική μεταβολή της μέσης τιμής της θερμοροής διαμέσου όλων των τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περίπτωση της απλής (s) και της φυτεμένης οροφής (g). Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή είναι πάντα αρνητική και παρουσιάζει μέγιστη τιμή, λίγο μετά τις μεσημεριανές ώρες. Για την περίπτωση της απλής οροφής οι τιμές της θερμοροής είναι μεγαλύτερες (κατά απόλυτη τιμή) λόγω της υψηλότερης εσωτερικής θερμοκρασίας και της χαμηλότερης εξωτερικής θερμοκρασίας που επικρατεί στην φυτεμένη οροφή. Σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, η αυξημένη θερμοροή στην περίπτωση της απλής οροφής οδηγεί σε αύξηση της εισερχόμενης ενέργειας (θερμότητα) στο εσωτερικού του δωματίου κατά 17%

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε χρονικά μεταβαλλόμενη 3Δ αριθμητική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός δωματίου με δύο εξωτερικούς τοίχους με ανοίγματα και δύο εσωτερικούς, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και την κάλυψη της ανωδομής για δύο περιπτώσεις οροφής, φυτεμένης και μη, και μελετήθηκε το θερμικό ηλιακό κέρδος και η θερμοροή κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής ημέρας. Επιλέχθηκε να εξεταστεί η ισημερία του Σεπτεμβρίου για περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας.

Σε ότι αφορά την επίδραση της φυτεμένης οροφής στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο έγινε η παραδοχή ότι μειώνει τοπικά τη θερμοκρασία κατά 4 βαθμούς σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Από τα αποτελέσματα προέκυψε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας οροφής και μικρότερη μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου για την περίπτωση της φυτεμένης οροφής, ενώ η μείωση του θερμικού ηλιακού κέρδους επιφέρει μείωση των ψυκτικών αναγκών του εσωτερικού χώρου κατά 17% περίπου.

Μελλοντική εργασία για την εξέλιξη και τον εμπλουτισμό του παρόντος αριθμητικού μοντέλου αποτελεί ο δυναμικός προσδιορισμός των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των φυτών και του περιεχομένου των στην οροφή αλλά και η επίδραση αυτών στο εσωτερικό περιβάλλον του υποκείμενου χώρου συναρτήσει της θέσης του ήλιου και του υγρασιακού περιεχομένου των φυτών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chui, E.H. and Raithby, G.D., 1993. *Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method*. Numerical Heat Transfer. Part B, Fundamentals 23:269-288.
- Eumorfopoulou, K. and Aravantinos, D., 1995. *Numerical approach to the contribution of the planted roof to the cooling of buildings*. Proceedings of the International symposium of passive cooling of buildings, Greece
- ELazzarin, M.R., Castellotti, F. and Busato, F., 2005. *Experimental measurements and numerical modeling of a green roof*. Energy and Buildings, 37:1260-1267.
- Ferziger, J.H. and Peric, M., 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, London
- Kim, S.H. and Huh, K.Y., 2000. *A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media*. International Journal of Heat and Mass Transfer 43:1233-1242.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974. *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3:269-289
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, A., Tsangrassoulis, A. and Mihalakakou, G., 2001. *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*. Energy and Buildings, 33:719-729 2001.
- Ondinu, S.N. and Murase, H., 2007. *Combining Galerkin methods and neural network analysis to inversely determine thermal conductivity of living green roof materials*. Biosystem engineering, 94(4):541-550.
- Palomo del Barrio, E., 1998. *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*. Energy and Buildings, 27:179-193
- Raithby, G.D. and 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.
- Raithby, G.D., 1999. *Discussion of the finite-volume method for radiation, and its application using 3D unstructured meshes*. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals 35:389-405
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A. and Patargias, P., 2007. *Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*. Energy, 32:1781-1788.
- Theodosiou, T.G., 2003. *Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique*. Energy and Buildings, 35:909-917
- Wilcox, D.C., 1994. *Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient*, AIAA Journal, Vol. 31:1414-1421.