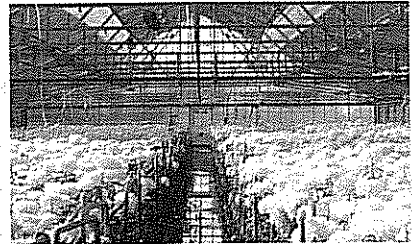
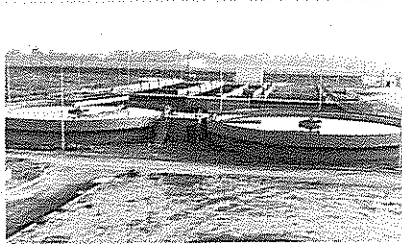
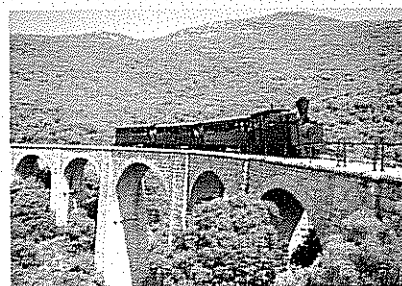




ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΑΔΟΣ



ΠΡΑΚΤΙΚΑ 2ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΒΟΛΟΣ
28 - 30 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2000

ΥΠΟ ΤΗΝ ΑΙΓΙΔΑ ΤΟΥ ΤΜ. ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

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

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

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

2ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Επιμέλεια Έκδοσης
Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη

ΒΟΛΟΣ
28 – 30 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2000

ΥΠΟ ΤΗΝ ΑΙΓΙΔΑ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

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

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



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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

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

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

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

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

Βόλος, Σεπτέμβριος 2000

Καθηγήτρια, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής

Οργανωτική Επιτροπή

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

Επιστημονική Επιτροπή

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

Κριτές Επιστημονικών Εργασιών

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

Γραμματεία Συνεδρίου

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

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

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

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

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

Εκθέτες

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

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

Ακριτίδης Κ.
Αλεξίου Ι.
Αλεξοπούλου Ε.
Αναστασιάδου – Παρθενίου Ε.
Αντωνόπουλος Β.
Αρβανίτης Κ.
Αριστοπούλου Α.
Βασιλειάδης Λ.
Βλειώρας Δ.
Βλειώρας Σ.
Βύργλας Π.
Γαλάνης Μ.
Γάτσιος Φ.
Γέμτος Θ.
Γεωργίου Π.
Γεωργούσης Χ.
Γιαγλάρας Π.
Γιακουμάκης Σ.
Γιαννόπουλος Σ.
Γκόλια Ε.
Γούλας Χ.
Δαλέζιος Ν.
Δαναλάτος Ν.
Δέρκας Ν.
Δερμίσσης Β.
Δήμας Ε.
Δημητριάδης Α.
Δημητρίου Ι.
Δομενικιώτης Χ.
Ευθυμιάδης Π.
Ζαλίδης Γ.
Ζέρβα Γ.
Ζήσης Θ.
Θεοδώρου Α.
Θεοχάρης Μ.
Θεοχαρόπουλος Σ.
Καβαδάκης Γ.
Καβαλάρης Χ.
Κάβουρας Σ.
Καλαϊτζίδου – Πάικου Ν.
Καλφούντζος Δ.
Καραγιάννη – Χρήστου Μ.
Καραϊβάζογλου Π.
Καραμάνης Μ.
Καραμούζης Δ.
Καραμούτης Χ.

Καραντούνας Γ.
Καραρίζος Π.
Κατσούλας Ν.
Κίττας Κ.
Κλάδης Γ.
Κοζής Γ.
Κουλουμπής Π.
Κουμπουλής Φ.
Κουτσομήτρος Σ.
Κυλινδρής Θ.
Κυρίτσης Σ.
Κωτσόπουλος Σ.
Λαμπρινός Γ.
Λέλλης Θ.
Λεμπέσης Γ.
Λόης Δ.
Λουκάς Α.
Λουλούδη Α.
Λουλούδη Β.
Λύκας Χ.
Μαλιδέρου Ε.
Μανωλιάδης Ο.
Μανωλοπούλου Ε.
Μαρτζόπουλος Γ.
Μασλάρης Ν.
Μητρόπουλος Δ.
Μήτσιος Ι.
Μήτσιου Χ.
Μιμίδης Θ.
Μισοπολινός Ν.
Μπαλόπουλος Ε.
Μπαμπατζιμόπουλος Χ.
Μπαρμπαγιάννης Ν.
Μπαρτζάνας Θ.
Μπερμπερίδης Κ.
Μπιλάλης Δ.
Μπόγδανος Κ.
Μπράμπα Δ.
Μπριασούλης Δ.
Μυστριώτης Α.
Νάματοβ Ε.
Νατιώτη Ε.
Νάτσης Α.
Νικήτα – Μαρτζοπούλου Χ.
Νικολάου Α.
Νούσιος Γ.

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

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

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

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

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η ΕΝΕΡΓΕΙΑ

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

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 4^η ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

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

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ – ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

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

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 6^η ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ

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

ΕΝΟΤΗΤΑ 7^η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

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

Ενέργεια

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΙΣΡΟΕΣ – ΕΚΡΟΕΣ ΚΥΡΙΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΜΑΣ

Κων/νος Α. Τσατσαρέλης

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών – Τμήμα Γεωπονίας
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας
540 06 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικές καλλιέργειες της χώρας μας όπως βαμβάκι, σιτηρά, αραβόσιτος, ζαχαρότευτλα, μηδική, ηλίανθος, καπνός αλλά και λιγότερο σημαντικές όπως μπάμια και βιομηχανική ντομάτα εξετάζονται ως προς τις ενεργειακές εισροές και εκροές τους κάτω από διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας και σε διαφορετικές περιοχές.

Εντοπίζονται τα στάδια και οι συντελεστές της παραγωγικής διαδικασίας όπου παρατηρούνται αυξημένες ενεργειακές εισροές. Δίνονται η παραγωγικότητα, η ένταση και ο βαθμός απόδοσης της ενέργειας έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται σύγκριση τόσο μεταξύ των καλλιεργειών όσο και μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

ENERGY INPUTS – OUTPUTS OF MAIN CROPS CULTIVATED IN GREECE

Constantinos A. Tsatsarelis

Aristotle University of Thessaloniki
School of Agriculture
Dept. of Agricultural engineering
540 06 Thessaloniki – Greece

ABSTRACT

Main crops in Greece, such as cotton, wheat, maize, maize for silage, sugar beets, alfalfa, sunflower, tobacco and other less important, as industrial tomatoes and okra were studied for energy inputs and outputs, under different cultivation systems.

Operations where excessive energy inputs can be observed and spotted. Energy productivity, intensity and efficiency are given in order to compare different crops and cultivation systems. Energy outputs for the same crops are also given.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο γεωργός για να επιτύχει το υψηλότερο δυνατό καθαρό γεωργικό εισόδημα θα πρέπει να ελέγχει συνεχώς το κόστος παραγωγής των προϊόντων του. Ο έλεγχος αυτός γίνεται για τον κάθε κλάδο παραγωγής χωριστά αλλά επίσης και για κάθε φάση της παραγωγικής διαδικασίας.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελέγχεται το κόστος καλύτερα και να παρεμβάινει στις φάσεις εκείνες, στους συντελεστές παραγωγής ή στις καλλιέργειες εκείνες όπου το κόστος τείνει να γίνει υψηλό με τελικό αποτέλεσμα χαμηλό καθαρό γεωργικό εισόδημα ή ακόμη και ζημία. Με τον συνεχή επίσης έλεγχο μπορεί να εντοπίσει και επιμέρους στοιχεία ή συντελεστές παραγωγής στα οποία μπορεί να γίνει αύξηση που θα οδηγήσει σε υψηλότερη καθαρή πρόσοδο.

Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιούνται οι γνωστές οικονομετρικές μέθοδοι με τις οποίες όλα τα στοιχεία αποτιμώνται σε χρήμα. Άλλη προσέγγιση που έχει προταθεί είναι η αποτίμηση σε ενεργειακές μονάδες (ισοδύναμη ενέργεια καυσίμων υλικών) που στηρίζεται σε μετατροπή όλων των προσφερομένων συντελεστών της παραγωγής καθώς και όλων των αποδιδόμενων προϊόντων της καλλιέργειας σε ενεργειακές μονάδες. Υπολογίζεται δηλαδή η επικουρική ενέργεια που εισρέει με κάθε μορφή στο οικοσύστημα και η ενέργεια που εκρέει με τα προϊόντα.

Το πλεονέκτημα της ενεργειακής αυτής ανάλυσης είναι ότι τα αποτελέσματά της δεν επηρεάζονται από πληθωρισμό ή άλλα αίτια (αλλαγές των τιμών κλπ). Η ενεργειακή ανάλυση είναι τεχνική, θα μπορούσε όμως να καταλήξει και σε οικονομικά αποτελέσματα εφόσον αποτιμηθεί η κάθε μορφή ενέργειας σε χρήμα, με τη βασική παρατήρηση ότι η τιμή μονάδας (δρχ/MJ) κάθε μορφής εισρέουσας ή εκρέουσας ενέργειας (π.χ. ανθρώπινη εργασία, μηχανική ενέργεια, σπόροι, λιπάσματα, φάρμακα κ.ο.κ.) είναι διαφορετική.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο προσδιορισμός των ενεργειακών εισροών βασίζεται στο ημερολόγιο εργασιών του παραγωγού, τη διάρκεια της κάθε εργασίας, τον αριθμό των εργατών, τα μηχανικά μέσα και τα υλικά (σπόροι, λιπάσματα, φάρμακα κ.ά.) που χρησιμοποιούνται για την κάθε εργασία.

Για την κάθε καλλιεργητική εργασία υπολογίζεται η ισοδύναμη ενέργεια καυσίμου που αντιστοιχεί στα υλικά που χρησιμοποιούνται, η ισοδύναμη ενέργεια εργασίας του χειριστή του μηχανήματος και των εργατών, η ενέργεια των καυσίμων και η ενσωματωμένη ενέργεια των μηχανημάτων που αντιστοιχεί στις ώρες λειτουργίας τους. Στην ενσωματωμένη ενέργεια περιλαμβάνεται η ενέργεια κατασκευής, μεταφοράς και επισκευής των μηχανημάτων. Διαιρώντας την ενέργεια αυτή με το συνολικό χρόνο οικονομικής ζωής των μηχανημάτων (ώρες) βρίσκεται η αντιστοιχούσα ενέργεια ανά ώρα λειτουργίας και εξ αυτής η ενέργεια που απαιτήθηκε για τις συγκεκριμένες καλλιεργητικές εργασίες.

Ο υπολογισμός των ενεργειακών αναγκών της καλλιέργειας στηρίζεται επίσης και σε ενεργειακό ισοδύναμο της ανθρώπινης ωριαίας εργασίας 2,2 MJ. Το ενεργειακό ισοδύναμο της ανθρώπινης εργασίας των 2,2 MJ/h είναι βασισμένο στην ημερήσια καταναλισκόμενη ενέργεια από τον άνθρωπο, με μορφή τροφής για τη συντήρησή του (3.500 kcal την ημέρα = 4 kWh = 14,5 MJ). Οι περισσότεροι ερευνητές για την ανάλυση των ενεργειακών απαιτήσεων λαμβάνουν ως βάση την ενέργεια της

αναλίσκόμενης τροφής [1,2]. Υπάρχει πάντως σοβαρή αντίρρηση από άλλους ερευνητές [3] αν η ανθρώπινη εργασία για την ανάλυση, θα πρέπει να υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό γιατί διατείνονται ότι για να φθάσει ο άνθρωπος μέχρι την ηλικία που να μπορεί να δουλέψει έχουν επενδυθεί μεγάλα ποσά ενέργειας για την ανάπτυξη και συντήρησή του, ένδυση, στέγαση, μόρφωση, περίθαλψη, διασκέδαση κ.ά. ώστε να μπορεί να παίρνει τις κατάλληλες αποφάσεις και να μπορεί να εκτελεί τις κατάλληλες εργασίες. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να ανεβάζουν το ενεργειακό ισοδύναμο της ανθρώπινης εργασίας από 29 MJ μέχρι και 450 MJ ανά ώρα εργασίας [4, 5]. Άλλοι ερευνητές [6] υπολογίζουν το ενεργειακό ισοδύναμο της εργασίας με βάση τη συνολική ενέργεια για την παραγωγή του εγχώριου προϊόντος. Μ'αυτή τη βάση υπολόγισαν ότι για τις ΗΠΑ το 1974 το ενεργειακό ισοδύναμο της ανθρώπινης εργασίας ήταν 25 MJ/h. Για τη χώρα μας θα μπορούσε να εκτιμηθεί σήμερα ότι προσεγγίζει τις 18 MJ/h.

Σε μια πλήρη ενεργειακή ανάλυση δεν θα πρέπει να παραλείπεται και η ισοδύναμη ηλιακή ενέργεια που ενσωματώνεται είτε στα φυτά με τη φωτοσύνθεση είτε στο έδαφος με τη διαδικασία δημιουργίας του εδάφους ή τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχή, χιόνια κλπ.) και την κατάλληλη θερμοκρασία. Στην περιοχή Θεσσαλονίκης η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που φθάνει στο έδαφος μετρήθηκε σε $5,15 \times 10^3$ MJ/m² το έτος [7, 8]. Εάν η ποσότητα αυτή διαιρεθεί με 2.000 όπως υποδεικνύουν οι ερευνητές Odum και Odum [6] για να μετατραπεί σε ισοδύναμη ενέργεια καυσίμων υλικών προκύπτει μια ισοδύναμη ηλιακή ενέργεια περίπου 26000 MJ/ha (2600 MJ/στρέμμα). Παρ'ότι η ενέργεια αυτή παρέχεται δωρεάν δεν θα πρέπει να παραλείπεται.

Αμέσως συνδεόμενες με τις ενεργειακές εισροές είναι και οι πιο κάτω έννοιες:

Βαθμός απόδοσης της ενέργειας: Είναι το ηλίκο της εκρέουσας ενέργειας από το οικοσύστημα ως προς την εισρέουσα (αδιάστατο μέγεθος). Δείχνει το βαθμό χρησιμοποίησης της εισρέουσας ενέργειας και είναι, όπως όλοι οι βαθμοί απόδοσης, χρήσιμος δείκτης για συγκρίσεις μεταξύ καλλιεργητικών συστημάτων και φυτών.

Ένταση της ενέργειας (MJ/kg): Το ηλίκο της ενέργειας που εισέρχεται (MJ/ha) ως προς την ποσότητα του προϊόντος που παρήχθη (kg/ha).

Παραγωγικότητα της ενέργειας (kg/MJ): Το αντίστροφο της έντασης δηλαδή η ποσότητα του προϊόντος που παρήχθη (kg/ha) ως προς την ενέργεια που δαπανήθηκε.

Και οι δύο πιο πάνω δείκτες είναι χρήσιμοι για συγκρίσεις όπως και ο βαθμός απόδοσης της ενέργειας.

Οι καλλιέργειες που παρουσιάζονται έχουν μελετηθεί με βάση ένα μακροχρόνιο ερευνητικό πρόγραμμα που περιλαμβάνει εκτός των φυτών μεγάλων καλλιεργειών και μόνιμες καλλιέργειες. Τα βασικά στοιχεία των καλλιεργειών έχουν ως ακολούθως:

α) **Βαμβάκι:** Μελετήθηκε καλλιέργεια 17 στρεμμάτων στην περιοχή της Καρδίτσας με άρδευση από βαθιά γεώτρηση (80 m) και χρήση ηλεκτροκινήτρα-αντλίας. Η ποικιλία ήταν η 4S. Η συλλογή έγινε με συλλεκτική δύο σειρών [9,10]. Το σύστημα καλλιέργειας θεωρείται τυπικό της περιοχής.

β) **Ζαχαρότευτλα:** Μελετήθηκε καλλιέργεια 15 στρεμμάτων στην περιοχή Σερρών. Το σύστημα καλλιέργειας είναι αυτό που συνιστά η Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης. Χρησιμοποιήθηκε σπόρος μονόσπερμης ποικιλίας και σπαρτική ακριβείας, πνευστού τύπου. Η άρδευση έγινε από βαθιά γεώτρηση και η συλλογή με μονόσειρη μηχανή. Τα ζαχαρότευτλα μεταφέρονταν στο ζαχαρουργείο σε απόσταση 51 km [11].

γ) **Μηδική:** Μελετήθηκε καλλιέργεια στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το σύστημα καλλιέργειας περιελάμβανε τις εντελώς απαραίτητες καλλιεργητικές εργασίες. Η άρδευση γίνονταν από βαθιές γεωτρήσεις με

ηλεκτροκινητήρες-αντλίες. Χρησιμοποιήθηκε σειρά ελκυστήρων και μηχανημάτων. Το χόρτο θερίζονταν με ταυτόχρονη σύνθλιψη και ακολουθούσε ανάδευση και δεματοποίηση [12].

δ) **Σιτηρά:** Μελετήθηκαν καλλιέργειες στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα συστήματα περιελάμβαναν τις εντελώς απαραίτητες ενέργειες και εισροές (λιπάσματα-σπόροι, φάρμακα). Μελετήθηκαν σιτηρά χωρίς δεματοποίηση του χόρτου καθώς και με δεματοποίηση. Μελετήθηκαν διαφορετικά συστήματα λίπανσης. Ελαφρά εαρινή άρδευση ελήφθη υπόψη σε ορισμένες περιπτώσεις [13].

ε) **Καλαμπόκι:** Μελετήθηκε καλλιέργεια καλαμποκιού ποικιλία Agis στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η άρδευση γινόταν από βαθιά γεώτρηση 80 m, με θερμικό εν στάσει κινητήρα. Η συγκομιδή έγινε με τετράσειρη μηχανή και επακολουθούσε ξήρανση.

στ) **Καλαμπόκι για ενσίρωση:** Μελετήθηκε επί σειρά ετών καλλιέργεια επίσπορο καλαμποκιού για ενσίρωση μετά από χειμερινά σιτηρά, στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα αφορούν καλλιέργεια με το σύστημα της κατευθείαν σποράς. Συγκεκριμένα μετά τη συγκομιδή των σιτηρών επακολουθούσε δεματοποίηση του αχύρου και στη συνέχεια κατευθείαν σπορά του καλαμποκιού (ποικιλίας Pioneer), με ειδική μηχανή. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνεται γρήγορη εγκατάσταση της νέας καλλιέργειας, οικονομία καυσίμου και χρόνου και παραγωγή που δεν υπολείπεται τον μάρτυρα (επίσπορο καλαμπόκι με μειωμένη κατεργασία). [14,15].

ζ) **Ηλιάνθος:** Μελετήθηκε καλλιέργεια ηλιάνθου ποικιλίας Viki στην περιοχή Ξάνθης. Η άρδευση γίνονταν με αυλάκια. Για την επιφανειακή άντληση του νερού χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροκινητήρας-αντλία. Η συγκομιδή έγινε με θεριζοαλωνιστική μηχανή.

η) **Βιομηχανική τομάτα:** Μελετήθηκε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας έκτασης 40 στρεμμάτων στην περιοχή Μαγνησίας. Η εγκατάσταση έγινε κατευθείαν στο χωράφι με σπορά σπόρου (χωρίς σπορείο και μεταφύτευση). Η συλλογή έγινε με εργάτες. Για την άρδευση χρησιμοποιήθηκε βαθιά γεώτρηση (70 m) και ηλεκτροκινητήρας-αντλία.

θ) **Μπάμια:** Μελετήθηκε καλλιέργεια 5,5 στρεμμάτων στην περιοχή Κιλκίς. Η άρδευση γίνονταν με ελκυστήρα-αντλία και καταϊωνισμό.

ι) **Καπνός τύπου Βιρτζίνια:** Μελετήθηκε καλλιέργεια στην περιοχή Ροδόπης. Στη μελέτη έχουν ενσωματωθεί τόσο οι εισροές στο σπορείο όσο και στον αγρό. Η καλλιέργεια αρδεύονταν από γεώτρηση 20 m. Στη μελέτη περιλαμβάνεται και η ξήρανση στα ειδικά ξηραντήρια καθώς και η χωρική επεξεργασία (δεματοποίηση). Η συλλογή έγινε με εργάτες.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο πίνακας 1 δείχνει τις ενεργειακές εισροές και την κατανομή τους στις καλλιεργητικές φάσεις καθώς και τις αντίστοιχες εκροές των καλλιεργειών που μελετήθηκαν. Περιλαμβάνει επίσης το βαθμό απόδοσης, την παραγωγικότητα και την ένταση της εισρέουσας ενέργειας. Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι ως εκροές ελήφθησαν μόνο τα κύρια προϊόντα των καλλιεργειών δηλαδή σύσπορο βαμβάκι, ρίζωμα των ζαχαρότευτλων, χόρτο μηδικής, καρπός καλαμποκιού, καρπός σιτηρών και καρπός με το άχυρο στη στήλη σιτηρά (2), φυτική μάζα καλαμποκιού για ενσίρωση, σπόροι του ηλιάνθου, καρποί της βιομηχανικής τομάτας, καρποί της μπάμιας και τα φύλλα του

Πίνακας 1. Ενεργειακές εισροές-εκροές βασικών καλλιεργειών της χώρας. Κατανομή στις καλλιεργητικές φάσεις. Βαθμός αρόδουσης, παραγωγικότητα και ένταση της ενέργειας.

Καλλιεργητική φάση	Βαθμικά	Ζαχαρό- τεύχια	Μηδισκή	Στέφρι(1)	Στέφρι(2)	Καλαμπόκι	Καλαμπόκι (ενοήφωση)	Ηλιανθος	Βιομηχ. Τομάτα	Μαύρα	Καννός (Βιοτεχνία)
ΕΙΠ/ΟΕΙ (ΜJ/ha)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ΕΙΠ/ΟΕΙ (ΜJ/ha)	82.575	108.425	115.971	16.120 - 26.070	20.540 - 31.940	102.720	87.360	32.230	74.370	70.114	120.125
Απόδοση	48,20	35,80	58,31	49,92 - 51,24	7,06 - 9,08	55,50	54,20	48,20	83,90	42,17	26,65
Αίτηση	21,07	10,58	3,64	4,69 - 5,42	40,20 - 40,70	22,30	23,80	20,12	4,39	21,39	4,74
Συνάγει	8,17	9,65	4,17	4,69 - 5,42	3,83 - 4,26	3,00	16,00	4,71	0,20	1,77	2,16
Μετακίνησης	5,17	3,14		7,55 - 8,13	6,16 - 6,38	2,70			3,78	6,57	
Σηροτό	3,00	0,53		12,62 - 15,60	10,30 - 12,24	3,00	4,10	1,69	0,67	2,15	
Κήρια και θερμ. κατεργασία				16,94 - 22,95	13,29 - 18,74						
Δευρ. κατεργασία	2,67	1,72				2,30		6,26	1,39	1,37	2,23
Υλεκρομολ	2,40	6,06							1,63	2,19	2,71
Καταν. Ζιζανίων	2,30	4,60	1,33	1,51 - 2,05	1,23 - 1,61	3,00	1,90	3,42	0,68	1,94	1,19
Σκόλιαση	2,21	1,92						0,59	0,45	0,17	0,54
Κήρια κατεργασία	1,61	1,98				3,10		11,50	2,85	3,15	3,43
Αεροθάλαση	0,90										
Κοπή στέλεχων	0,86					0,60					0,63
Μεταρροές	0,82	23,98		0,06 - 0,08		0,40		3,51			15,96
Απιδόμια		0,04							0,06	0,11	
Εκκαθάριση			8,72								
Ανδένιση			1,50								
Διαταρολήση			15,17		2,17 - 3,38						0,43
Μεταφύτευση											2,26
Κορμολόγημα											1,26
Φύσηση-Πεταρροές			7,16		7,12 - 11,08						
Είληψη						4,10					51,77
ΕΚ/ΟΕΙ (Κg/ha)	3.200	61.100	45.900	2.500 - 5.000	2.500 - 5.000	10.000	36.680	3.245	55.910	13.230	2.825
ΕΚ/ΟΕΙ (ΜJ/ha)	55.040	153.972	725.535	37.800 - 75.600	119.090 - 189.000	145.800	474.600	76.257	51.440	22.490	188.430
Βαθμός αρόδουσης	0,66	1,42	6,256	2,35 - 2,90	5,79 - 5,92	1,42	5,43	2,37	0,69	0,32	1,57
Παραγωγικότητα (Κg/MJ)	0,137	0,564	0,396	0,155 - 0,192		0,097	0,42	0,10	0,75	0,19	0,03
Ένταση (MJ/Kg)	7,28	1,775	2,527	5,20 - 6,45		10,3	2,38	9,93	1,33	5,28	42,52

Πίνακας 2. Ενεργειακές εισροές βασικών καλλιεργειών της χώρας: Κατανομή κατά συντελεστής παραγωγής.

Συντελεστής παραγωγής	Βαμιάκι	Ζαχαρά- τεύλα	Μηδική	Σιτάρι (1)	Σιτάρι (2)	Καλαμπόκι	Καλαμπόκι (ενοίκωση)	Ηλιανθος	Βιομηχ. τομάτα	Μπαμπού	Κυριάς (Βιολέτινα)
ΕΙΣΡΟΕΣ (ΜJ/ha)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Ανθράκωνη εργασία	0,38 (72,37)	0,32 (79,68)	78,99 (78,99)	35,93 - 42,39 (44,71 - 58,47)	4,40 (21,2)	14,35 (22,3)	11,33 (4,18)	7,59 (20,89)	16,10 (4,44)	1,42 (89,43)	54,66 (89,43)
ΜΗΚΑΝΗΜΑΤΑ	21,97 (43,95)	70,92 (41,72)	16,46 (20,81)	31,18 - 36,47 (46,63 - 51,40)	37,61 - 48,5 (38,07 - 70,35)	69,80 (4,4)	15,36 (22,3)	22,94 (20,12)	7,48 (4,18)	65,19 (20,89)	18,67 (4,44)
Ηλεκτρ. Ενεργεια	6,45 (20,18)	8,76 (10,29)	20,81 (7,29)	4,75 - 5,92 (46,63 - 51,40)	7,10 - 9,97 (38,07 - 70,35)	4,40 (21,2)	14,35 (22,3)	12,42 (20,12)	11,33 (4,18)	7,59 (20,89)	16,10 (4,44)
Απόβ. μηχανημάτων	18,86 (36,09)	9,03 (9,67)	2,56 (1,14)	42,69 - 46,03 (1,17 - 1,37)	34,85 - 36,12 (1,26 - 1,80)	20,20 (4,1)	21,10 (1,25)	18,42 (3,07)	3,47 (1,34)	18,94 (3,15)	2,54 (4,71)
Φύσσορος	1,32 (2,52)	1,26 (9,67)	4,73 (1,14)	3,94 - 4,25 (1,17 - 1,37)	3,22 - 3,33 (1,26 - 1,80)	1,00 (4,1)	1,20 (1,25)	1,70 (3,07)	0,42 (1,34)	1,95 (3,15)	0,94 (4,71)
Κόλλ				0 - 1,12	0 - 0,9				0,29		0,96
ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΑ											
Εντομοκτόνα	3,31	3,69				2,10			1,12	1,49	2,52
Ζιζανιοκτόνα	2,78	4,34	1,14	0,98 - 1,18	0,3 - 0,8	2,00	1,25	3,07	0,22	1,66	2,19
Μικροκτόνα		1,64		0,19	0,96 - 1,0						
Σπόροι	0,98	0,04	0,61	9,86 - 11,26	8,05 - 8,84	0,30	0,35	0,36	0,06	0,86	
Σύνολο δειματοποίησης			11,97								

καπνού. Εάν ελαμβάνοντο ως εκροές και τα δευτερεύοντα υλικά (βιομάζα), τότε οι εκροές ως ποσότητα (kg/ha) αλλά και ως εκρέουσα ενέργεια θα ήταν πολύ υψηλότερες με αποτέλεσμα οι δείκτες να ήταν βελτιωμένοι.

Να παρατηρηθεί όμως ότι μέρος αυτής της βιομάζας (του παραπροϊόντος της καλλιέργειας) ή και το σύνολό της επαναχρησιμοποιείται από τις επόμενες καλλιέργειες όταν ενσωματώνεται στο έδαφος. Στις περιπτώσεις αυτές οι εισροές θα πρέπει να περιλαμβάνουν και την ενέργεια της φυτομάζας που ενσωματώνεται πάλι στο έδαφος.

Ο πίνακας 2 δίνει τις εισροές των ίδιων καλλιεργειών με κατανομή τους ανά συντελεστή παραγωγής. Οι ενεργειακές δαπάνες των λιπασμάτων δίνονται συνολικά και αναλυτικά. Το ίδιο και των φυτοφαρμάκων. Οι ενεργειακές δαπάνες των μηχανημάτων δηλαδή καύσιμο diesel, ηλεκτρική ενέργεια και ενεργειακή απόσβεση των μηχανημάτων δίνονται αναλυτικά και αθροιστικά, ώστε να φανεί το μέγεθος της συμβολής των στις συνολικές ενεργειακές δαπάνες.

4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Από τους πίνακες 1 και 2 προκύπτουν τα ακόλουθα:

4.1. Μηχανήματα

Από τον πίνακα 2 φαίνεται ότι οι ενεργειακές δαπάνες που οφείλονται στα μηχανήματα (καύσιμο και ενσωματωμένη ενέργεια) καλύπτουν τα υψηλότερα ποσοστά του συνόλου των εισροών. Στις εαρινές καλλιέργειες κυμαίνεται σε ποσοστά 70-90%, ενώ στα χειμερινά σιτηρά 35-60%. Η μέγιστη συμμετοχή των μηχανημάτων στις ενεργειακές δαπάνες είναι προφανής λόγω της πλήρους εκμηχάνισης όλων των παραγωγικών σταδίων των καλλιεργειών. Ειδικότερα οι ενεργειακές εισροές που οφείλονται στα μηχανήματα επηρεάζονται: α) Από την ένταση χρήσης τους (καλλιεργητικά συστήματα, συστήματα κατεργασίας κ.ά.). β) Από την ορθολογική εκλογή ελκυστήρα και παρελκομένων καθώς και των άλλων αυτοκινούμενων μηχανημάτων. γ) Από το βαθμό ορθολογικής χρήσης τους καθώς και τις φροντίδες συντήρησής τους.

4.2. Άρδευση

Το ενεργειακό κόστος των αρδευόμενων εαρινών καλλιεργειών είναι σαφώς πολλαπλάσιο εκείνων των χειμερινών σιτηρών, γεγονός που οφείλεται τόσο στην εντατικότερη χρήση των μηχανημάτων όσο και κυρίως στις δαπάνες άρδευσης.

Η άρδευση των εαρινών καλλιεργειών, όταν γίνεται με άντληση νερού από βαθιές γεωτρήσεις καλύπτει ποσοστά των ενεργειακών εισροών που κυμαίνονται ανάλογα με την καλλιέργεια, την περιοχή, το βάθος άντλησης, το αρδευτικό συγκρότημα κ.ά. από 35-65% του συνόλου των δαπανών.

Οι υψηλές αυτές δαπάνες οφείλονται: α) Στις συνολικές ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται από τους αγρότες για την άρδευση των καλλιεργειών. β) Στο βάθος άντλησης. γ) Στον ολικό βαθμό απόδοσης των αρδευτικών συγκροτημάτων. δ) Στα συστήματα άρδευσης.

4.3. Λίπανση

Από τους πίνακες 1 και 2 φαίνεται ότι η λίπανση των καλλιεργειών απαιτεί σημαντικότερα ποσά ενέργειας. Στις χειμερινές καλλιέργειες, λόγω των μειωμένων συνολικών εισροών οι απαιτήσεις κυμαίνονται μεταξύ 40 και 50% των εισροών. Στις αρδευόμενες εαρινές, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων κυρίως άρδευσης αλλά και των

μειωμένων απαιτήσεων ορισμένων καλλιεργειών σε λιπαντικά στοιχεία, οι ενεργειακές εισροές της λίπανσης κυμαίνονται μεταξύ 5 και 20%. Οι μεγάλες ενεργειακές εισροές οφείλονται πρωτίστως στο άζωτο, λόγω και της μεγάλης ενσωματωμένης ενέργειας και των μεγάλων ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται. Η συμμετοχή των άλλων στοιχείων (φώσφορος ή και κάλιο) είναι περιορισμένη λόγω της μικρότερης ενσωματωμένης ενέργειας και των μικρών ποσοτήτων. Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση των ψυχανθών (μηδική) όπου η αζωτούχος λίπανση περιορίζεται δραστηκότατα λόγω της αζωτοδέσμευσης από τα αζωτοβακτήρια.

Η ενεργειακή ανάλυση εμφανίζει πολύ καθαρά το γνωστό ήδη πρόβλημα της μη ορθολογικής χρήσης των λιπασμάτων κυρίως των αζωτούχων. Αποτέλεσμα της οποίας είναι κυρίως η ρύπανση εδαφών και υδάτων αλλά και η αύξηση του κόστους παραγωγής. Μείωση επομένως των ποσοτήτων στις εντελώς απαραίτητες συμβάλλει και στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά και στη μείωση του ενεργειακού κόστους. Ορθή πρακτική και πολιτική είναι η χρήση ψυχανθών στο σύστημα αμειψισποράς. Καλό είναι οι παραγωγοί να μην απομακρύνονται παντελώς από τις βασικές αρχές της επιστήμης και της τεχνικής κυρίως της αμειψισποράς, εκτός όλων των άλλων και για την επίλυση των προβλημάτων λίπανσης.

4.4. Φυτοφάρμακα

Από τον πίνακα 2 φαίνεται ότι η χρήση φυτοφαρμάκων συμμετέχει στις ενεργειακές δαπάνες με ποσοστά που κυμαίνονται από 1-10% ανάλογα με την καλλιέργεια. Αν και η ενεργειακή δαπάνη για τα περισσότερα φυτά δεν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως υψηλή, εντούτοις παρατηρείται μία συνεχής αύξηση της δαπάνης αυτής τα τελευταία χρόνια. Οι ενεργειακές δαπάνες των φυτοφαρμάκων οφείλονται κυρίως στην πολύ υψηλή ενσωματωμένη ενέργειά τους και δευτερευόντως στις ποσότητες που χρησιμοποιούνται. Η ορθολογική χρήση τους (εποχή, ποσότητα, είδος φυτοφαρμάκων, σωστή εφαρμογή κ.ά.) θα περιορίζαν αισθητά τις επεμβάσεις και τις ποσότητες με αποτέλεσμα μείωση των εισροών, κυρίως όμως μείωση του προβλήματος της μόλυνσης των εδαφών και των υδάτων καθώς και των γεωργικών προϊόντων από τα υπολείμματα. Ειδικότερα για τα ζιζανιοκτόνα θα πρέπει να γίνει κατανοητό από τους παραγωγούς ότι για μείωση των ενεργειακών εισροών και για καλύτερη καταπολέμηση αλλά κυρίως για άμβλυνση του προβλήματος της μόλυνσης του εδάφους και των υδάτων θα πρέπει να γίνεται συνδυασμένη χρήση ζιζανιοκτόνων και μηχανικής καταπολέμησης. Εκτός τούτων μείωση του πληθυσμού των ζιζανίων επιτυγχάνεται και με κατάλληλο σύστημα αμειψισποράς.

4.5. Βαθμός απόδοσης της ενέργειας

Ως προς το βαθμό απόδοσης της ενέργειας παρατηρείται ότι μεταξύ των διαφορετικών καλλιεργειών υπάρχουν πολύ μεγάλες διαφορές, από 0,32 και 0,66 στις μπάμιες και το βαμβάκι αντιστοίχως μέχρι 5,43 και 6,25 για το καλαμπόκι για ενσίρωση και τη μηδική. Οι βαθμοί πάντως που εμφανίζονται στον πίνακα 1 δεν αποτελούν ασφαλή δείκτη για την ικανότητα φωτοσύνθεσης των φυτών και τη αποδοτικότερη χρήση της επικουρικής ενέργειας, για το λόγο ότι ως εκροές λαμβάνεται μόνο το “εμπορικό” τμήμα του φυτού (καρποί, φύλλα, φυτική μάζα). Για ασφαλή συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότερη χρήση της επικουρικής ενέργειας αλλά και την ικανότητα φωτοσύνθεσης είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός στις εκροές όλων των προϊόντων των φυτών (καρποί, βλαστοί, ρίζες).

Παρά τα ανωτέρω όμως ο βαθμός απόδοσης αποτελεί έναν ασφαλή δείκτη για συγκρίσεις της ίδιας καλλιέργειας κάτω από διαφορετικά συστήματα ή διαφορετικές

εδαφοκλιματικές συνθήκες. Ο βαθμός απόδοσης θα μπορούσε να αυξηθεί είτε με μείωση των εισροών χωρίς όμως να επηρεασθούν οι εκροές (παραγωγή) είτε ακόμη και με ελαφρά αύξηση των εισροών η οποία όμως θα οδηγούσε σε ταχύτερη αύξηση των εκροών.

Μελέτες αύξησης του βαθμού απόδοσης στο βαμβάκι έδειξαν ότι μειώνοντας τις εισροές κατά 15% ,χωρίς να μειωθεί η παραγωγή, επήλθε αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά περίπου 15%. Η μείωση των εισροών προήλθε κυρίως από την άρδευση, τη λίπανση και την καταπολέμηση των ζιζανίων.

Ανάλογες μελέτες στα ζαχαρότευτλα έδειξαν επίσης βελτίωση του βαθμού απόδοσης με μείωση της αζωτούχου λίπανσης, του νερού άρδευσης καθώς και των συστημάτων κατεργασίας του εδάφους είτε ανεξαρτήτως είτε και σε συνδυασμό μεταξύ τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

1. Παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις εισροές και εκροές μεταξύ των διαφορετικών φυτών, λόγω κυρίως των διαφορετικών απαιτήσεων σε καλλιεργητικές φροντίδες, άρδευση και λίπανση. Οι εαρινές αρδευόμενες καλλιέργειες απαιτούν σημαντικώς υψηλότερες εισροές σε σύγκριση με τις φθινοπωρινές

2. Οι ενεργειακές εισροές στις καλλιέργειες που μελετήθηκαν επηρεάζονται κυρίως από την άρδευση και τη λίπανση ιδιαίτερα την αζωτούχο.

3. Το ενεργειακό κόστος των μηχανημάτων είναι πολύ υψηλό λόγω της πλήρους εκμηχάνισης των περισσότερων καλλιεργειών.

4. Τα φυτοφάρμακα συμμετέχουν αρκετά στη διαμόρφωση του ενεργειακού κόστους. Μηχανική και χημική καταπολέμηση των ζιζανίων μπορεί να μειώσει τις εισροές και να προστατεύσει καλλίτερα το περιβάλλον από τη ρύπανση.

5. Ο βαθμός απόδοσης της ενέργειας είναι δυνατό να βελτιωθεί, σε πολλές καλλιέργειες, με ορθολογικότερη χρήση των μηχανημάτων και των λιπασμάτων.

6. Εναλλαγή καλλιεργειών (αμειψισπορά) στην οποία περιλαμβάνονται ψυχανθή συντελεί ώστε να μειώνονται οι ενεργειακές δαπάνες λίπανσης αλλά και οι δαπάνες καταπολέμησης των ζιζανίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pimentel, D., C.W. Hall. 1984. Food and energy resources. Academic Press. N.Y.
2. Stanhill, G. 1980. The energy cost of protected cropping: A comparison of six systems of tomato production. J. agric. Engng. Res 25: 145-154.
3. Avlani, R.K., W.J. Chancellor. 1977. Energy requirements for wheat production and use in California. Transactions of the ASAE. 20:429-437.
4. Slessor, M. 1973. Energy subsidy as criterion in food policy. J. Sci. Food Agric. 24 :1193-1209.
5. Fluck, R.C. 1976. To evaluate labor energy in food production. Agric. Engn. 57 (1) :31-32.
6. Fluck, R.C., C.D. Baird. 1982. Agricultural energetics. AVI. Publ. Co, Westport, Connecticut.
7. Flocas, A.A. 1980. Estimation and prediction of global solar radiation over Greece. Solar Energy. 24:63-70.

8. Katsoulis, B.D., C.E. Papachristopoulos. 1978. Analysis of solar radiation measurement at Athens Observatory and estimates of solar radiation in Greece. *Solar Energy*. 21:217-226.
9. Τσατσαρέλης, Κ.Α. 1991. Ενεργειακό ισοζύγιο βαμβάκοκαλλιέργειας στην περιοχή Καρδίτσας. *Επιστημονική Επετηρίδα του τμήματος Γεωπονίας*. Τόμος 28:249-268.
10. Tsatsarelis, C.A. 1991. Energy requirements for cotton production in Central Greece. *J. agric. Engng Res*. 50:239-246.
11. Tsatsarelis, C.A. 1992. Energy flow in sugarbeet production in Greece. *Applied Engineering in Agriculture*. 8(5):585-589.
12. Tsatsarelis, C.A., D.S. Koundouras. 1994. Energetics of baled alfalfa hay production in northern Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 49:123-130.
13. Tsatsarelis, C.A. 1993. Energy inputs and outputs for soft winter wheat production in Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 43:109-118.
14. Τσατσαρέλης, Κ.Α. 1996. Καλλιέργεια αραβοσίτου για ενσίρωση με σύστημα κατευθείαν σποράς σε ακαλλιέργητο έδαφος. *Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου «Εγγειοβελτιωτικά έργα, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκμηχάνιση της γεωργίας»*. Λάρισα: 966-976.
15. Λιθουργίδης, Α.Σ., Κ.Α. Τσατσαρέλης. 1998. Καλλιέργεια επίσπορου αραβοσίτου με το σύστημα της κατευθείαν σποράς. *Πρακτικά 1^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής*. Αθήνα :87-88.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΗΔΙΚΗΣ ΣΕ ΩΡΟ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

Κ.Β. Ακριτίδης¹, Α.Ν. Δημητριάδης²

¹ Καθηγητής, ² Επιστημονικός Συνεργάτης
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54006 Θεσσαλονίκη
e-mail: akritid@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσομοίωση της διεργασίας της ξήρανσης μηδικής αποσκοπεί στην καλύτερη διερεύνηση του φαινομένου καθώς και στην εξαγωγή κατασκευαστικών δεδομένων για τα ξηραντήρια σταθερού σωρού. Η κατάστρωση του μοντέλου βασίστηκε σε ένα σύστημα πέντε διαφορικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τις φυσικοχημικές ιδιότητες του προϊόντος όσο και ψυχομετρικά χαρακτηριστικά του αέρα ξήρανσης. Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου καθώς και οι συντελεστές ξήρανσης που επεισέρχονται συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις σε ξηραντήριο μηδικής σταθερού σωρού.

MATHEMATICAL SIMULATION OF ALFALFA DRYING IN DEEP-BED

C.B. Akritidis¹, A.N. Dimitriadis²

¹ Professor of Agricultural Engineering, ² Research Assistant
Dept of Agricultural Engineering
Aristotle University of Thessaloniki, 54006 Thessaloniki – Greece
e-mail: akritid@agro.auth.gr

ABSTRACT

A mathematical simulation of the drying process of alfalfa is presented aiming to produce design data for alfalfa dryers. A fixed bed dryer was modeled through a system of five partial and ordinary differential equations. The differential equations, which describe the changes of the physical and chemical properties of the product, as well as the psychrometric data of the drying air, were solved using the thin-layer drying theory. In order to check the accuracy of the model drying rate curves of various thin layers were calculated and the results compared with experimental measurements, under the same conditions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν την ξήρανση σε ξηραντήρια χόρτου σταθερού σωρού μεγάλου βάθους, παρουσιάζουν συγκεκριμένες δυσκολίες επειδή βασικοί παράμετροι που επηρεάζονται στη διεργασία δεν παραμένουν σταθεροί σε όλη την διάρκεια της. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να συνδεθούν με τις μεταβλητές, όπως για παράδειγμα με την περιεχόμενη υγρασία του χόρτου, τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης και τη θερμοκρασία του υλικού, με τη διατύπωση εξισώσεων που προσεγγίζουν τις παραμέτρους αυτές σε σχέση με το χρόνο.

Το αποτέλεσμα της διεργασίας της ξήρανσης δεν είναι μόνο η μείωση της υγρασίας του ξηραίνόμενου υλικού, αλλά και η αλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει του χρόνου. Με την μείωση της περιεχόμενης υγρασίας έχουμε αύξηση της ξηράς ουσίας αναγόμενο στον συνολικό όγκο και κατά συνέπεια αύξηση της συνολικής πυκνότητας του υλικού. Αυτό οδηγεί στην αύξηση των διάκενων μέσα στο υλικό και άρα στην ευκολότερη διέλευση του αέρα μέσα από το υλικό (αύξηση της ειδικής παροχής)

Ο στόχος της εργασίας είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων που σχετίζονται με τη διεργασία της ξήρανσης του χόρτου μηδικής και ο υπολογισμός της παροχής του αέρα μέσα στο σωρό, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.

Η διατύπωση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα ξήρανσης και του υλικού, γίνονται με τις ακόλουθες παραδοχές:

1. Η κατανομή του υλικού είναι ομοιόμορφη σ' όλο το χώρο.
2. Δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας από τα τοιχώματα του ξηραντηρίου.
3. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του υλικού είναι οι ίδιες σε όλο τον όγκο του
4. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα ξήρανσης μεταβάλλεται μόνο κατά τον άξονα X.
5. Η μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα ξήρανσης συναρτήσει του χρόνου ($(\partial T / \partial x, \partial H / \partial x)$) είναι αμελητέες σε σύγκριση με τη μεταβολή τους συναρτήσει του διαστήματος $\partial T / \partial x, \partial H / \partial x$.
6. Η μεταβολή της υγρασίας του υλικού σ' όλο το βάθος του θεωρούμενου στρώματος πάχους Δx είναι η ίδια.
7. Η αρχική θερμοκρασία του υλικού είναι ίση με τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την έναρξη της διεργασίας.

Κατά την διάρκεια της ξήρανσης του υλικού, εξετάζουμε την διαφοροποίηση πέντε μεταβλητών: την θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης (T), την θερμοκρασία του υλικού (Θ), την απόλυτη υγρασία του αέρα ξήρανσης (H), την περιεχόμενη υγρασία του χόρτου και την ταχύτητα κίνησης του αέρα (v).

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην κατάστρωση του μοντέλου είναι:

Εξίσωση μεταβολής της θερμότητας του αέρα,

$$\frac{dT}{dx} = \frac{K_f}{\rho_a \cdot v_a (c_a + Hc_v)} (T - \Theta) \quad (1)$$

Εξίσωση μεταβολής της θερμότητας του προϊόντος,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K_f}{\rho_m (c_m + Mc_w)} (T - \Theta) - \frac{\rho_a v_a}{\rho_m} \cdot \frac{h_{fg} + c_v (T - \Theta)}{c_m + Mc_w} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

Εξίσωση μεταβολής της μάζας των υδρατμών,

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\rho_m}{\rho_a v_a} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

Εξίσωση μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας,

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (4)$$

Εξίσωση της ταχύτητας κινήσεως του αέρα είναι:

$$v_{ai} = \frac{dx_i}{dt} \quad (5)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (4) ως προς M, λαμβάνουμε την εξίσωση (6):

$$M = M_e + (M_o - M_e) e^{-kt} \quad (6)$$

3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ξήρανης, λόγω της συρρίκνωσης του υλικού καθώς η περιεχόμενη υγρασία του χόρτου αποβάλλεται. Αν q είναι η παροχή του αέρα και S η διατομή του υλικού, ο λόγος $Q = q / S$ θα αναφέρεται ως ειδική παροχή και έχει διαστάσεις ταχύτητας. Όταν όμως ο αέρας διέρχεται από τη μάζα του υλικού, κινείται μόνο στους κενούς χώρους και η μέση πραγματική ταχύτητα του είναι:

$$v_{ai} = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (7)$$

όπου ε είναι το πορώδες και δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon = 1 - \rho_m \left(\frac{\rho_w + M \rho_m}{\rho_w \cdot \rho_m} \right) \quad (8)$$

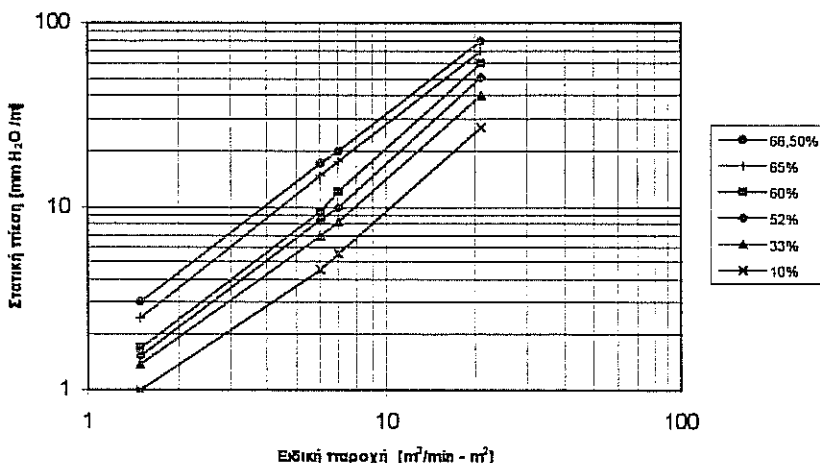
Η τιμή της ειδικής παροχής Q, ο οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα και την πτώση της στατικής πίεσης ΔP του αέρα μέσα στη μάζα του υλικού [1], δίνεται από την εξίσωση:

$$Q = \alpha \Delta P^b \quad (9)$$

Ο Day [2] προσδιόρισε πειραματικά τις τιμές των σταθερών α, b για χόρτο μηδικής με διάφορες υγρασίες και παρέστησε τις συναρτήσεις σε νομογράφημα με λογαριθμικές συντεταγμένες (σχήμα 1). Με τον τρόπο αυτό οι συναρτήσεις των εξισώσεων (9) και (7) αν και παραβολικής μορφής μετατρέπονται σε ευθείες.

Με δεδομένη την ειδική παροχή του αέρα και την αρχική περιεχόμενη υγρασία του χόρτου, σε ένα πραγματικό ξηραντήριο, μπορούμε να προσδιορίσουμε το σημείο εκκίνησης της διεργασίας, στο νομογράφημα του σχήματος 1, αν από το σημείο εκκίνησης της διεργασίας P (Q_o, M_o) φέρουμε κάθετη στην ευθεία μεταβολής $\Delta P=f(Q)$ που αντιπροσωπεύει την επόμενη μικρότερη υγρασία. Από το σημείο αυτό φέρουμε κάθετη στην ευθεία της επόμενης μικρότερης υγρασίας κ.ο.κ.

Με τη διαδικασία αυτή προσδιορίζεται η εξίσωση της καμπύλης $Q=f(M)$, η οποία συνδέει την ειδική παροχή του αέρα με την περιεχόμενη υγρασία του χόρτου. Για κάθε σωρό χόρτου με διαφορετική αρχική περιεχόμενη υγρασία, χαράζεται μια διαφορετική ευθεία. Όλες οι ευθείες, που προκύπτουν, είναι παράλληλες και ισχύουν στο πεδίο περιεχόμενων υγρασιών 10 έως 90 % ξ.ο.



Σχήμα 1 Καμπύλες μεταβολής πτώσης στατικής πίεσης συναρτήσει της ειδικής παροχής (περιεχόμενη υγρασία % φ.κ.)

Για τον υπολογισμό του ισορροπού ποσοστού υγρασίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας T και της απόλυτης υγρασίας H εφαρμόστηκε η εμπειρική εξίσωση:

$$M_e = c_1 \frac{\sqrt{H}}{T^2} + c_2 \quad (10)$$

Οι τιμές των σταθερών c_1 και c_2 της εξίσωσης (10) υπολογίστηκαν από πειραματικά δεδομένα [3], [4] και [5], με στατιστική επεξεργασία τους:

$c_1 = 82.7$, $c_2 = 0.34$ για $M > M_c$ και $c_1 = 350$, $c_2 = 0.017$ για $M < M_c$

όπου $M_c = 0.36$ είναι το κρίσιμο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας επί ξηράς ουσίας για το χόρτο μηδικής [6].

Η σταθερά ξήρανσης της εξίσωσης (4) υπολογίστηκε από τους Callaghan et al. [3] για το χόρτο μηδικής:

$$k = 4.97 \cdot 10^{-5} e^{(0.07214 T_0)} \quad \text{για } M > M_c \quad (11)$$

$$k = 9.26 \cdot 10^{-6} e^{(0.07675 T_0)} \quad \text{για } M < M_c \quad (12)$$

Στις εξισώσεις (11) και (12) ορίστηκε ένας νέος αδιάστατος συντελεστής, τον οποίο ονομάσαμε δυναμικό ξήρανσης, και δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = \frac{P - P_s}{P_0 - P_s} \quad (13)$$

Εισάγοντας το δυναμικό ξήρανσης στις εξισώσεις (11) και (12) η σταθερά ξήρανσης, για το χόρτο μηδικής, γίνεται:

$$k = 4.97 \cdot 10^{-5} e^{(0.07214 \varepsilon T_0)} \quad \text{για } M > M_c \quad (14)$$

$$k = 9.26 \cdot 10^{-6} e^{(0.07675 \varepsilon T_0)} \quad \text{για } M < M_c \quad (15)$$

Για τιμές της περιεχόμενης υγρασίας του χόρτου μηδικής μικρότερες της δεύτερης κρίσιμης υγρασίας (M_{c2}), στην εξίσωση (15) επεισέρχεται ο συντελεστής ενεργότητας

του νερού μέσα στο υλικό a_w (water activity), ο οποίος εκφράζει τον αδιάστατο λόγο της μερικής πίεσης του ατμού μέσα στο υλικό (P_p) προς την πίεση κορεσμού σε ορισμένη θερμοκρασία (P_s).

$$a_w = \frac{P_p}{P_s} \quad (16)$$

Η πίεση κορεσμού του αέρα P_s υπολογίζεται, σε P_a , με ικανοποιητική προσέγγιση [7]. Η ενεργότητα της υγρασίας μέσα στο υλικό είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του υλικού, της περιεχόμενης υγρασίας του και της σχετικής υγρασίας του αέρα ξήρανσης [8], [9], δηλαδή είναι $\varepsilon = f(a_w, \Phi)$. Επομένως, η ταχύτητα μεταβολής της υγρασίας του υλικού είναι συνάρτηση των παραμέτρων $a_w = f(T, M)$ και $\Phi = f(T, H)$, δηλαδή είναι συνάρτηση δεύτερου βαθμού ως προς τη θερμοκρασία. Αν ληφθεί υπόψιν ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας του υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της υγρασίας του, ο συντελεστής κινητικότητας, που επηρεάζεται στη σταθερά k είναι:

$$\mu = (1 - a_w)^2 \quad (17)$$

Η κινητικότητα της περιεχόμενης υγρασίας στο ξηραίνόμενο υλικό δεν επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα ξήρανσης στα στάδια σταθερής μεταβολής της υγρασίας και του πρώτου σταδίου μειούμενης ταχύτητας μεταβολής. Κατά τη διάρκεια όμως του δεύτερου σταδίου μειούμενης ταχύτητας ξήρανσης επιβραδύνεται σημαντικά η κινητικότητα της περιεχόμενης υγρασίας, λόγω των πολύπλοκων δεσμών συγκράτησης της υγρασίας.

Η κρίσιμη υγρασία έναρξης του δεύτερου σταδίου μειούμενης ταχύτητας ξήρανσης είναι $M_{c2} = 0,2$ επί ξ.ο. [10].

Οι εξισώσεις (14) και (15) διαμορφώνονται ως εξής:

$$k = 4,97 \cdot 10^{-1} e^{0,07214 \cdot T_0} \quad \text{για } M > 0,36 \quad (18)$$

$$k = 9,26 \cdot 10^{-6} e^{0,07674 \cdot T_0} \quad \text{για } 0,2 < M < 0,36 \quad (19)$$

$$k = 9,26 \cdot 10^{-6} e^{0,07674 \cdot \mu \cdot T_0} \quad \text{για } 0,2 < M \quad (20)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραδοχές 2 και 5 και την εξίσωση (5), η εξίσωση (1) γίνεται:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K_f}{\rho_a (c_a + Hc_v)} (T - \Theta) \quad (21)$$

Η τιμή του συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας μέσα στο υλικό [11] είναι:

$$h_c = 0,1997 \left[\frac{\rho_a V_a (T + 273)}{P_{at}} \right]^{0,6011} \quad (22)$$

Από τις εξισώσεις (2), (3), (6), λαμβάνουμε:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{h_c - \rho_p c_v k (M - M_e)}{\rho_p (c_p + M c_w)} (T - \Theta) - \frac{h_{fg} k (M - M_e)}{c_p + M c_w} \quad (23)$$

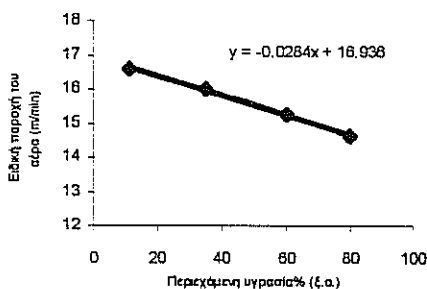
Οι εξισώσεις (21) και (23) αποτελούν σύστημα δυο διαφορικών εξισώσεων με δυο αγνώστους (T , Θ) ως προς το χρόνο t , δηλαδή είναι σύστημα της μορφής:

$$\frac{dT}{dt} = f_2(t, T, \Theta) \quad \text{και} \quad \frac{d\Theta}{dt} = f_1(t, T, \Theta) \quad (24)$$

Το σύστημα αυτό δεν έχει αναλυτική λύση. Η αριθμητική λύση του επιτυγχάνεται με τη μέθοδο Runge-Kutta τέταρτης τάξης [12]. Το πρόγραμμα υπολογισμού του μοντέλου έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

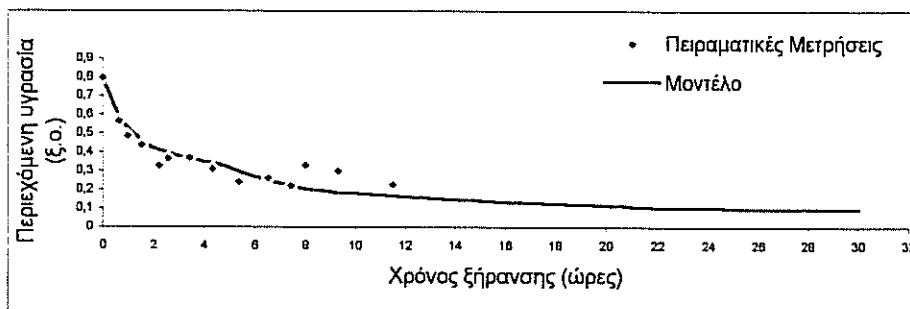
Για τον έλεγχο της ακρίβειας του μοντέλου, συγκρίθηκαν οι θεωρητικές καμπύλες ξήρανσης με πειραματικές μετρήσεις. Οι Clark and Lamond [13] μέτρησαν την περιεχόμενη υγρασία χόρτου μηδικής σε ξηραντήριο σταθερού σωρού, και τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις ίδιες συνθήκες ξήρανσης. Τα πειράματα έγιναν για διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης (αρχική θερμοκρασία, βάθος σωρού, αρχική περιεχόμενη υγρασία του χόρτου, ειδική παροχή κλπ.).



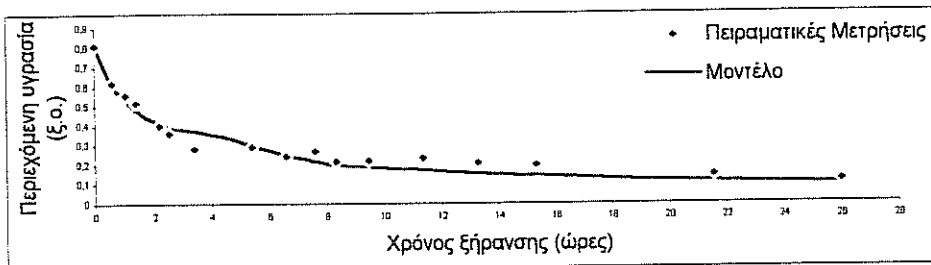
Σχήμα 2 Ειδική παροχή του αέρα συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας του υλικού

Όπως έχει αναφερθεί η ειδική παροχή του αέρα δεν είναι σταθερή, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Η στιγμιαία παροχή σε χρόνο Δt υπολογίζεται με τη βοήθεια του σχήματος 1 ως συνάρτηση της αρχικής υγρασίας του υλικού. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται, ενδεικτικά, η ειδική παροχή του αέρα για το πρώτο πείραμα. Η περιεχόμενη υγρασία του χόρτου μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά βάθη σωρού: στο πρώτο, στο μεσαίο και στο τελευταίο στρώμα ξήρανσης. Ωστόσο τα πειραματικά δεδομένα του τελευταίου στρώματος παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διασπορά και ασυνέχειες, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους.

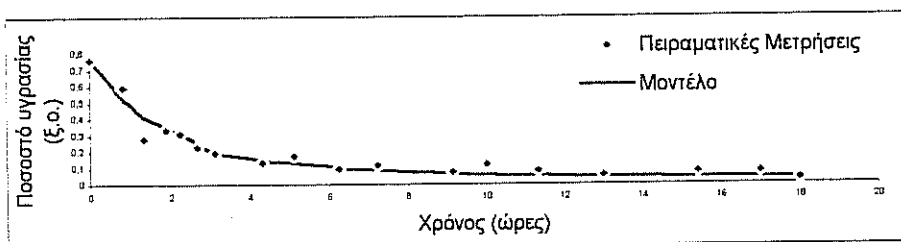
Στα σχήματα 3, 4, 5, 6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το στρώμα εισαγωγής του αέρα.



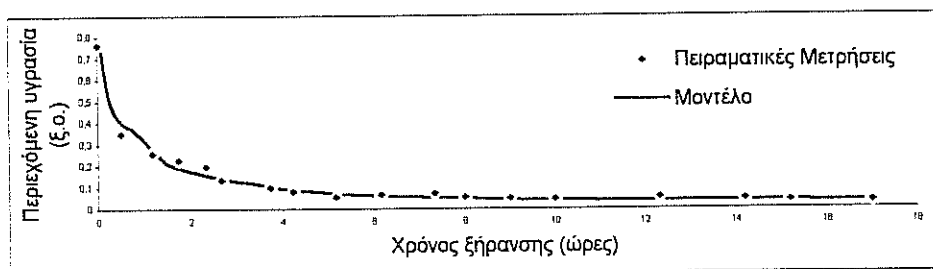
Σχήμα 3. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το στρώμα εισαγωγής του αέρα (Πρώτο πείραμα)



Σχήμα 4. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το στρώμα εισαγωγής του αέρα (Δεύτερο πείραμα)

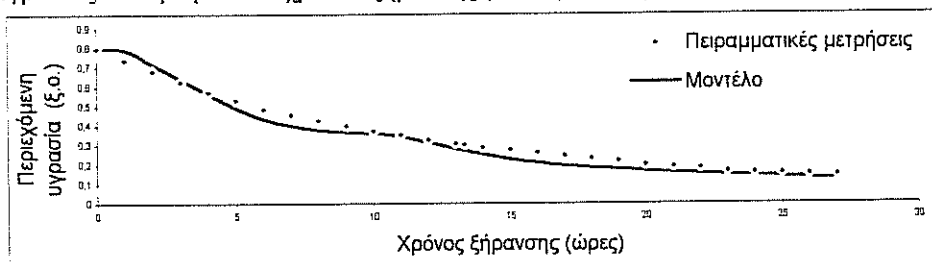


Σχήμα 5 Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το στρώμα εισαγωγής του αέρα (Τρίτο πείραμα)

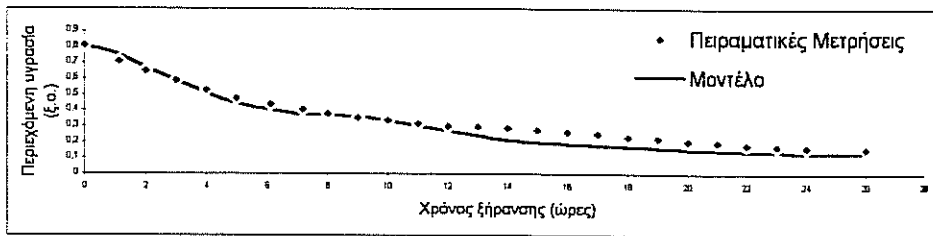


Σχήμα 6. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το στρώμα εισαγωγής του αέρα (Τέταρτο πείραμα)

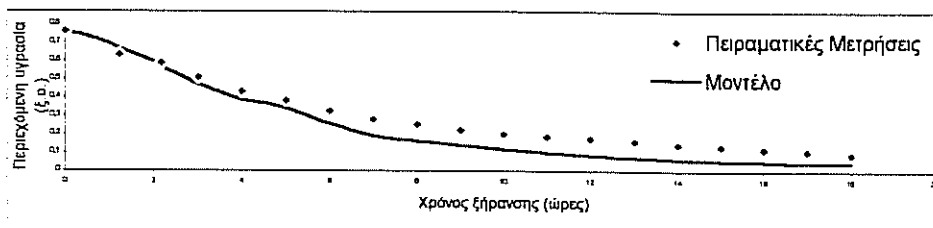
Στα σχήματα 7, 8, 9, 10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το μέσο στρώμα.



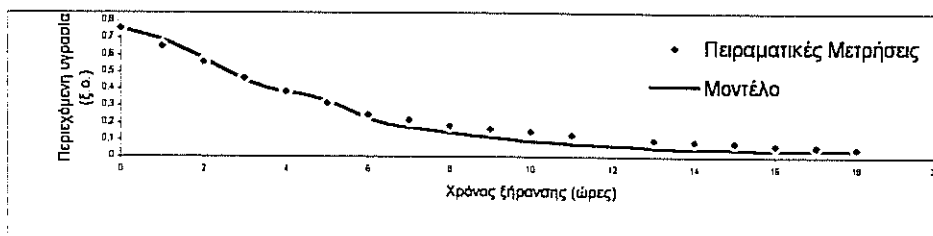
Σχήμα 7. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το μέσο στρώμα ξήρανσης (Πρώτο πείραμα).



Σχήμα 8. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το μέσο στρώμα ξήρανσης (Δεύτερο πείραμα).



Σχήμα 9. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το μέσο στρώμα ξήρανσης (Τρίτο πείραμα).



Σχήμα 10. Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για το μέσο στρώμα ξήρανσης (Τέταρτο πείραμα).

Από τα σχήματα 3-10 φαίνεται ότι μέχρι ποσοστού υγρασίας 20% φ.κ., η καμπύλη του μοντέλου ακολουθεί τα πειραματικά σημεία, ενώ για μικρότερες τιμές (χαμηλότερες από το όριο ασφαλούς αποθήκευσης για την μηδική) παρουσιάζεται μικρή απόκλιση, με τελική τάση στο ισορροπο ποσοστό υγρασίας. Οι μικρές αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στο ότι η επιλογή των τιμών των παραμέτρων, που επηρεάζονται στις εξισώσεις, να διαφέρουν μεταξύ των θεωρητικών λύσεων και των πειραματικών μετρήσεων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για το μεσαίο στρώμα πιθανώς αναφέρονται σε ανηγμένες τιμές, γεγονός που επιτείνει την αναντιστοιχία μεταξύ των επιλεγισών τιμών των παραμέτρων. Ωστόσο αποδεικνύεται η καλή προσέγγιση της διεργασίας της ξήρανσης σε μεγάλο βάθος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Με την προτεινόμενη μέθοδο είναι δυνατό να προβλεφθεί η περιεχόμενη υγρασία του ξηρανούμενου υλικού σε οποιοδήποτε βάθος και χρονική στιγμή.
2. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σημαντική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων, για περιοχές ξήρανσης μέχρι 20% φ.κ.
3. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται για πρώτη φορά στην ανάλυση της παρούσας εργασίας και συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του αέρα ξήρανσης (ϵ) και την κινητικότητα του νερού στο υλικό (μ), συμβάλουν στην επιτυχή προσέγγιση του φαινομένου της διεργασίας.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

a_w	συντελεστής ενεργότητας του νερού μέσα στο υλικό,	
c_a	ειδική θερμότητα του αέρα,	$\text{KJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_m	ειδική θερμότητα του χόρτου,	$\text{KJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_v	ειδική θερμότητα του ατμού,	$\text{KJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_w	ειδική θερμότητα του νερού,	$\text{KJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
ϵ	πορώδες δεκαδικός,	
H	απόλυτη υγρασία του αέρα,	kg kg^{-1}
h_c	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	$\text{KJ m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$
h_{fg}	λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης,	KJ kg^{-1}
h_{fm}	λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης από το υλικό,	KJ kg^{-1}
k	σταθερά ξήρανσης,	
K_f	θερμική αγωγιμότητα του αέρα,	$\text{W/m}^2 \text{K}$
M	περιεχόμενη υγρασία του, % η δεκαδικός	kg kg^{-1}
M_{c1}	κρίσιμη υγρασία, δεκαδικός	
M_{c2}	δεύτερη κρίσιμη υγρασία, δεκαδικός	
M_e	ισόρροπο ποσοστό υγρασίας,	kg kg^{-1}
P	ολική πίεση,	kg m s^{-2}
P_{at}	ατμοσφαιρική πίεση,	kg m s^{-2}
P_o	αρχική πίεση ξηρού αέρα,	kg m s^{-2}
P_s	πίεση κορεσμού του αέρα,	kg m s^{-2}
P_v	πίεση ατμού,	kg m s^{-2}
P_w	πίεση κορεσμένου ατμού,	kg m s^{-2}
Q	ειδική παροχή,	$\text{m}^3 \text{min m}^{-2}$
S	επιφάνεια ελέγχου,	m^2
t	χρόνος,	s
T	θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης,	$^{\circ}\text{C}$
T_w	θερμοκρασία δρόσου,	$^{\circ}\text{C}$
T_s	θερμοκρασία του κορεσμένου αέρα,	$^{\circ}\text{C}$
v_a	ταχύτητα κινήσεως του αέρα,	$\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$
v_{ai}	μέση πραγματική ταχύτητα κινήσεως του αέρα,	$\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$
ρ_a	πυκνότητα του αέρα,	kg m^{-3}
ρ_m	πυκνότητα του προϊόντος,	kg m^{-3}
ρ_w	πυκνότητα του νερού,	kg m^{-3}
V	όγκος,	m^3
μ	συντελεστής κινητικότητας	
Θ	θερμοκρασία του προϊόντος,	$^{\circ}\text{C}$

Φ	σχετική υγρασία του αέρα, % η δεκαδικός	
x	συντεταγμένες σωρού,	m
X	συνολικό βάθος σωρού,	m

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Shedd C.K. 1953. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agric. Engng.* 34: 616.
2. Day C.L. 1964. Resistance of Hay to Air Flow. Research Bulletin 864. University of Missouri – Columbia, U.S.A.
3. O'Callaghan J.R., Menzies D.J. and Bailey P.H., 1971. Digital simulation of agricultural drier performance, *J. Agric. Engng Res.* 16: 223-244
4. Hall C.W. 1980. Drying and Storage of Agricultural Crops. AVI Publ. Co.
5. Ακριτίδης Κ.Β. 1977. Μαθηματική Ανάλυση και Επίλυση του προβλήματος χόρτου σε ξηραντήρια Μεγάλου Βάθους, Διατριβή επί Υφηγεσία, Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη 1977
6. Henderson J.M., Henderson S.M. 1968. A computation procedure for deep-bed drying analysis. *J. Agric. Engng. Res.* 13:87-95.
7. Ακριτίδης Κ.Β. 1993. Ξήρανση – Αποθήκευση Γεωργικών προϊόντων, Θεσσαλονίκη.
8. Pakowski Z. 1999. Impressions of IDS'98. *Drying Technology*, 17(6), 1247-1253.
9. Azzouz S., Jomaa W., Belghith A. 1998. Drying kinetic equation of single layer of grapes. Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98). Halkidiki, Greece. Vol. B, pp. 988-997.
10. Dexter S.T., Sheldom W.H., Waldran D.I. 1947, Equilibrium moisture content of alfalfa hay. *Agric. Engng.* (28) 295-296.
11. Spencer H.B., 1969. A mathematical simulation of grain drying. *J. Agric. Engng. Res.* 14: 226-235.
12. Conte S.B., De Boor C. 1972. Elementary numerical analysis: An Algorithmic approach, McGram – Hill Book Company (second edition)
13. Clark R.G., Lamond W.J. 1968. Forced air drying of herbage: effect of drying air conditions, *J. Agric. Engng. Res.* 13 (1) 19-26.

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΜΕ ΜΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

A.N. Δημητριάδης, Κ.Β. Ακριτίδης , Κ.Γ. Αρβανίτης

**Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
540 06 Θεσσαλονίκη, e-mail: akritid@agro.auth.gr**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σημαντικό μέρος της απαιτούμενης ενέργειας για την εξάτμιση του νερού, σε βιομηχανικούς ξηραντήρες, μπορεί να εξοικονομηθεί με την ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών, μέσω συστήματος δύο εναλλακτών θερμότητας και τρίοδης δικλείδας ροής του αέρα ξηράνσεως. Στην εργασία αυτή βελτιστοποιείται η λειτουργία του συστήματος με αυτόματο έλεγχο της λειτουργίας του. Διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατή η εξοικονόμηση 20-45% της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα κατά την έξοδό του από το ξηραντήριο.

ENERGY SAVING IN DRYING PLANTS BY PARTIAL RECOVERY OF THE LATENT HEAT

A.N. Dimitriadis, C.B. Akritidis and K.G. Arvanitis

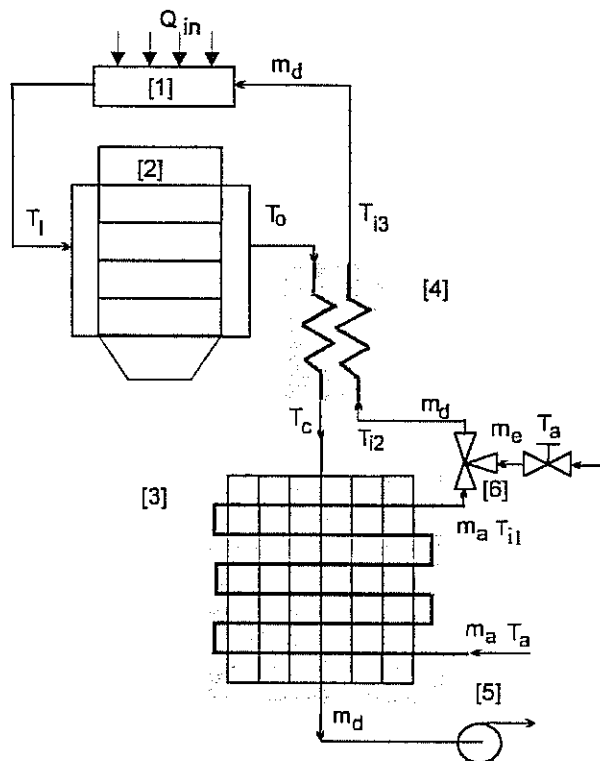
**Dept of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering
Aristotle University of Thessaloniki, 540 06 Thessaloniki, Greece
E-mail: akritid@agro.auth.gr**

ABSTRACT

A system to save energy in drying plants has been presented in previous papers. Recovering part of the latent heat of the vapor that is evaporated from the material being dried can save energy. The heat recovery is accomplished through a two-stage heat exchanger system, wherein the first stage brings the primary circuit to vapor saturation conditions, while the second stage acts as a condenser. Optimization of the system operation and an automated process control implementation is presented in this work. An amount of 20 to 45 % of the energy demand can be saved depending mainly on the temperature of the drying air at the exit of the drier.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βιομηχανικοί ξηραντήρες συνήθως λειτουργούν με μεγάλες θερμικές απώλειες, κυρίως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσεως, ο οποίος εξέρχεται ακόρεστος με σχετικά υψηλή θερμοκρασία. Ένα μέρος της αποβαλλόμενης θερμικής ενέργειας μπορεί να ανακυκλωθεί με την τοποθέτηση απλού εναλλάκτη θερμότητας στην έξοδο του ξηραντηρίου, μέσω του οποίου προθερμαίνεται ο αέρας ξήρανσης [1]. Με τη μέθοδο αυτή δεν είναι δυνατό να ανακτηθεί η λανθάνουσα θερμότητα των ατμών που έχουν εξατμισθεί από το ξηραίνόμενο υλικό, εκτός εάν εφαρμοστούν αντλίες θερμότητας, οι οποίες επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος ξήρανσης [2]. Οι Moraitis and Akritidis [3] πρότειναν ένα σύστημα που προσαρμόζεται σ' οποιονδήποτε ξηραντήρα για την εξοικονόμηση ενέργειας με μερική ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας του εξερχόμενου αέρα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δύο εναλλάκτες θερμότητας με σειριακό πρωτεύον κύκλωμα. Με τον πρώτο εναλλάκτη δημιουργούνται συνθήκες κορεσμού μέρους των εξερχομένων υδρατμών, ενώ με τον δεύτερο εναλλάκτη οι κορεσμένοι υδρατμοί συμπυκνώνονται. Με την διεργασία αυτή ανακτάται μέρος της λανθάνουσας θερμότητας των εξερχομένων από τον ξηραντήρα υδρατμών. Το διάγραμμα της όλης εγκατάστασης φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διάταξη του συστήματος

Ο αέρας ξήρανσης θερμαίνεται στην πηγή (1) και παροχετεύεται στο ξηραντήριο (2) με θερμοκρασία T_i , από το οποίο εξέρχεται με θερμοκρασία T_o . Ο εξερχόμενος αέρας κατά κανόνα είναι ακόρεστος, δηλαδή, η θερμοκρασία T_o είναι σημαντικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού T_c , η οποία αντιστοιχεί στη μερική πίεση των υδρατμών που περιέχονται στον εξερχόμενο αέρα. Διοχετεύοντας τον αέρα, που εξέρχεται από το ξηραντήριο, στο πρωτεύον ρεύμα του εναλλάκτη θερμότητας (4) μπορεί να μειωθεί η θερμοκρασία του από T_o στη θερμοκρασία κορεσμού T_c , προθερμαίνοντας έτσι το δευτερεύον ρεύμα, το οποίο αποτελεί τη ροή μάζας του αέρα ξήρανσης. Οι παροχές μάζας στο πρωτεύον και δευτερεύον ρεύμα αυτού του εναλλάκτη είναι πρακτικά ίσες. Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί για την προθέρμανση του αέρα ξήρανσης, $T_{i3}-T_{i2}$ είναι ίση με T_o-T_c . Για να επιτευχθεί αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει η θερμοκρασία T_{i2} να είναι μερικούς βαθμούς χαμηλότερη από την θερμοκρασία T_c . Αυτή η διαφορά της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται εάν ατμοσφαιρικός αέρας παροχής m_a προθερμανθεί από τον εναλλάκτη συμπύκνωσης (3) και στη συνέχεια η μάζα που έχει προθερμανθεί αναμιχθεί με μία ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα παροχής m_e . Με τη διεργασία αυτή, μέρος των υδρατμών του πρωτεύοντος ρεύματος συμπυκνώνονται μέσα στον εναλλάκτη συμπύκνωσης ελευθερώνοντας σημαντική ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας των συμπυκνούμενων υδρατμών. Η αναλογία της παρεχόμενης μάζας ατμοσφαιρικού αέρα m_a ως προς τη συνολική παροχή m_a ($m_a=m_a+m_e$) ελέγχεται με ένα σύστημα τριοδικής ηλεκτροβάνας.

Από την προηγηθείσα περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος γίνεται φανερό ότι πρέπει να επιτευχθούν οι βέλτιστες τιμές ενός αριθμού παραμέτρων, οι οποίες εξαρτώνται από το χαρακτηριστικά του ξηραίνόμενου υλικού και τις συνθήκες ξήρανσης, αλλά και από έμμεσες παραμέτρους οι οποίες διασφαλίζουν την μεγιστοποίηση της ανάπτυξης της θερμότητας. Ο έλεγχος των παραμέτρων αυτών γίνεται με μικροϋπολογιστή μέσω μιας σειράς αριθμητικών και αναλογικών σημάτων εισόδου και εξόδου για τη συνεχή συλλογή των αναγκαίων δεδομένων και τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών, οι οποίες πραγματοποιούνται με τους κατάλληλους ενεργοποιητές. Για την εκτίμηση της ποσότητας της ανακτόμενης θερμότητας, έχουν διερευνηθεί οι παράμετροι ξήρανσης, οι οποίες δίνουν την βέλτιστη αναλογία m_a/m_e , ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας T_o και της σχετικής υγρασίας του εξερχόμενου αέρα από το ξηραντήριο.

2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1. Μαθηματικό μοντέλο των εναλλακτών θερμότητας

Όλες οι διατάξεις που έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο αφορούν την εκτίμηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία του ξηραντηρίου, ανεξάρτητα από τις διατάξεις ανάκτησης της θερμότητας. Εντούτοις, εφόσον οι διατάξεις εγκατασταθούν προσδιορίζουν και τις παραμέτρους που αφορούν το σύστημα των εναλλακτών θερμότητας. Η μέγιστη ποσότητα θερμότητας, που μπορεί να ανακτηθεί, υπολογίζεται από ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με μία ανεξάρτητη παράμετρο, δηλαδή, την αναλογία m_a / m_e . Το σύστημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με οποιαδήποτε μέθοδο ελαχιστοποίησης [4] ώστε να προσδιοριστεί ο λόγος m_a/m_e , ο οποίος μεγιστοποιεί την ποσότητα της ανακτόμενης θερμότητας. Έτσι υπολογίζεται ο βέλτιστος λόγος ανάμιξης των

μαζών. Η βέλτιστη αυτή συνθήκη επιτυγχάνεται με ενεργοποίηση της τριόδου ηλεκτροβάνας (6) του σχήματος 1, μέσω της οποίας δημιουργούνται οι δύο ροές μάζας του αέρα (τα δύο ρεύματα του αέρα).

$$\Delta Q_{(4)IN} = (\dot{m}_d c_{pa} + \dot{m}_v c_{pw})(T_o - T_e) \quad (1)$$

$$\Delta Q_{(4)OUT} = K_1 \dot{m}_d (T_{i3} - T_{i2}) \quad (2)$$

$$\Delta Q_{(3)IN} = K_2 \dot{m}_w h_{fg} \quad (3)$$

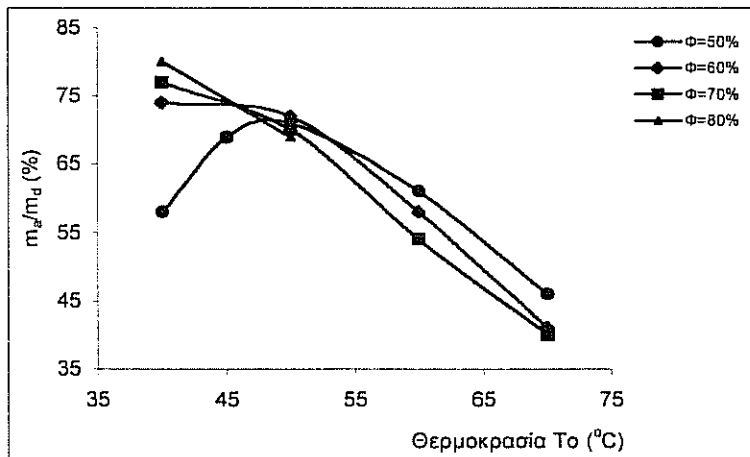
$$\Delta Q_{(3)OUT} = \dot{m}_a c_p (T_{i1} - T_a) \quad (4)$$

$$\dot{m}_e T_a c_{pa} + \dot{m}_a T_{i1} c_{pa} = \dot{m}_d T_{i2} c_{pa} \quad (5)$$

$$\dot{m}_e + \dot{m}_a = \dot{m}_d \quad (6)$$

2.2. Αυτόματος έλεγχος της βελτιστοποίησης

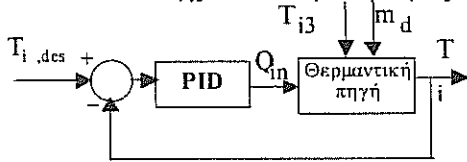
Η επίλυση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων ως προς τον λόγο \dot{m}_a/\dot{m}_d με τον οποίο μεγιστοποιείται η ποσότητα της ανακτόμενης θερμότητας φαίνεται στο σχήμα 2, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα εξόδου από το ξηραντήριο.



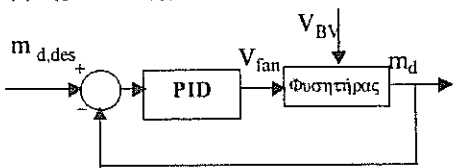
Σχήμα 2. Λόγος των μαζών ροής ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του εξερχόμενου αέρα, για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας.

Από άποψη αυτομάτου ελέγχου της διεργασίας, υπάρχουν τρεις κύριες ποσότητες, οι οποίες πρέπει να ρυθμιστούν: (α) Η θερμοκρασία T_i . Σ' αυτό το κύκλωμα ελέγχου απαιτούνται οι τιμές T_{i3} και \dot{m}_a , οι οποίες είναι γνωστές (μετρήσιμες) διαταραχές και μπορούν να αποσβεστούν μέσω ενός PID ρυθμιστή. Στο σχήμα 3 φαίνεται η διαδικασία ελέγχου και οι μεταβλητές του βρόχου ελέγχου. (β) Η παροχή μάζας \dot{m}_a . Το επιθυμητό μέγεθος λαμβάνεται με ρύθμιση της τάσης V_{fan} του ανεμιστήρα. Στο σχήμα 4 φαίνεται η διαδικασία ελέγχου και οι μεταβλητές του βρόχου ελέγχου. (γ) Η θερμοκρασία στην έξοδο

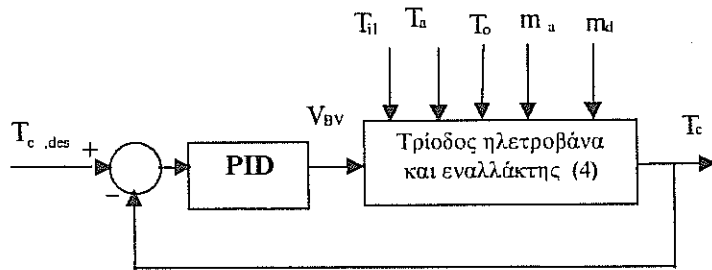
του εναλλάκτη αντιρροής T_c . Γι' αυτό το κύκλωμα ελέγχου απαιτούνται οι τιμές T_{i2} , T_a , T_o , καθώς και οι παροχές μάζας m_a , m_d , οι οποίες είναι γνωστές (μετρήσιμες) διαταραχές και μπορούν να αποσβεστούν μέσω ενός PID ρυθμιστή, ο οποίος σχεδιάστηκε έτσι ώστε το σήμα εξόδου να διατηρεί την τιμή της επιθυμητής θερμοκρασίας συμπύκνωσης $T_{c,des}$. Στο σχήμα 5 φαίνεται η διαδικασία ελέγχου και οι μεταβλητές του βρόχου ελέγχου.



Σχήμα 3. Έλεγχος της θερμοκρασίας T_i



Σχήμα 4. Έλεγχος της παροχής m_d



Σχήμα 5. Έλεγχος της θερμοκρασίας T_c

Όλες οι διεργασίες ελέγχου, που έχουν περιγραφεί μπορούν να πραγματοποιηθούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη και να επιλεγεί ο κατάλληλος PID ρυθμιστής, σύμφωνα με τις οδηγίες που έχουν περιγραφεί [5]. Οι παράμετροι του PID ρυθμιστή μπορούν να μεταβληθούν αυτομάτως με μεταβολή των μετρήσιμων φορτίων, μέσω αυτορυθμιζόμενων τεχνικών. Ας σημειωθεί ότι οι επιθυμητές τιμές των T_i και m_d πρέπει να προυπολογισθούν με δεδομένες τις βέλτιστες συνθήκες ξήρανσης, οι οποίες σχετίζονται με το συγκεκριμένο ξηραίνόμενο υλικό. Οι ενεργοποιητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο σύστημα ελέγχου είναι η παρεχόμενη θερμότητα από την πηγή θέρμανσης, Q_{in} , ο ανεμιστήρας και η δικλειδα ροής αντίστοιχα.

Για την προσομοίωση του όλου συστήματος ελέγχου, παρουσιάζονται παρακάτω τα μαθηματικά μοντέλα καθενός από τα υποσυστήματα που έχουν περιγραφεί. Τονίζεται ότι η παρακάτω ανάλυση αφορά τη διαδικασία ελέγχου των μετρήσιμων μεγεθών χωρίς να παρουσιάζονται οι μηχανισμοί των υποσυστημάτων ελέγχου.

2.2.1. Προσομοίωση λειτουργίας της πηγής θερμότητας

Η ποσότητα θερμότητας Q_{in} ρυθμίζεται μέσω μεταβολής τάσης. Δηλαδή, είναι ένα αναλογικό σήμα. Υποθέτοντας ότι οι απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον είναι αμελητέες σε σύγκριση με την θερμότητα που παροχετεύεται στον αέρα ξήρανσης, ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dT_i}{dt} = -\frac{m_d}{V}(T_i - T_{i3}) + Q_{in} \frac{1}{c_p V} \quad (7)$$

Υποθέτοντας μηδενικές αρχικές συνθήκες η περιγραφή με όρους του μετασχηματισμού Laplace γράφεται:

$$T_i(s) = \frac{1}{\frac{c_p m_d}{V} s + 1} Q_{in}(s) + \frac{1}{\frac{V}{m_d} s + 1} T_{i3}(s) = \frac{K_e}{\tau_e s + 1} Q_{in}(s) + \frac{1}{\tau_e s + 1} T_{i3}(s) \quad (8)$$

όπου το κέρδος και η χρονική σταθερά της διεργασίας εκφράζονται ως:

$$K_e = \frac{1}{c_p m_d}, \quad \tau_e = \frac{V}{m_d}$$

Η εξίσωση (8) εκφράζει ένα σύστημα πρώτου βαθμού. Η συνάρτηση $Q_{in}(t)$ αποτελεί την ελεγχόμενη τιμή εισόδου και η συνάρτηση $T_{i3}(t)$ αποτελεί ένα μετρήσιμο φορτίο διεργασίας.

2.2.2. Προσομοίωση λειτουργίας του ανεμιστήρα

Θεωρώντας ως μηδενική την αδράνεια της ροής του αέρα, στο σύστημα υπεισέρχεται μόνο η δυναμική της ροπής αδρανείας του ανεμιστήρα. Για την περιγραφή αυτής της δυναμικής είναι ικανοποιητικό ένα μοντέλο πρώτης τάξης, το οποίο κατά κανόνα δίνει ακριβή προσέγγιση στην εκκίνηση και λειτουργία μικρών κινητήρων. Ας σημειωθεί ότι, η σταθερά χρόνου για τέτοιους κινητήρες είναι 2-5 s, η οποία είναι εφικτή δεδομένου ότι η σταθερά χρόνου ενός πηνίου είναι μικρότερη από 0,05 s. Οι παράμετροι αυτού του συστήματος πρώτης τάξης μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν με δοκιμαστικές μετρήσεις της απόκρισης του κυκλώματος έναρξης και λειτουργίας του κινητήρα. Ο βαθμός ανοίγματος της δικλείδας ροής του αέρα αποτελεί ένα από τα μετρήσιμα φορτία του συστήματος, καθόσον είναι προφανές ότι επηρεάζει σημαντικά την απαιτούμενη παροχή του αέρα ξήρανσης.

2.2.3. Προσομοίωση λειτουργίας της δικλείδας ροής

Η δικλείδα ροής (Butterfly Valve-BV) ρυθμίζει την παροχή μάζας m_e . Όταν η δικλείδα είναι εντελώς κλειστή θα είναι $BV=0$ και $m_e=0$, ενώ όταν είναι εντελώς ανοικτή θα είναι $BV=1$ και $m_e=m_{e,max}$, η οποία είναι συνάρτηση της ροής μάζας του αέρα ξήρανσης m_a . Επομένως, η δικλείδα ροής λειτουργεί ως ένας ολοκληρωτής με κατώτερο και ανώτερο όριο κορεσμού 0 και 1, αντίστοιχα, ενώ το βήμα μεταβολής εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διόδου ροής. Το βήμα μεταβολής είναι κατά προσέγγιση ανάλογο της παροχής μάζας m_a . Εάν η λειτουργία της δικλείδας ελέγχεται από τάση V_{BV} , έχουμε:

$$m_e = K_{BV} m_a \int_0^t V_{BV} dt, \quad \text{με εύρος μεταβολής } 0 < \int_0^t V_{BV} dt < 1.$$

Υποθέτοντας πλήρη μίξη των μαζών των δύο ρευμάτων ροής, ισχύει:

$$T_{i2} m_d = T_{i1} m_a + T_a m_e = T_{i1} (m_d - m_e) + T_a m_e = T_{i1} m_d + (T_a - T_{i1}) m_e$$

$$\text{Επομένως, } T_{i2}(t) = T_{i1} + (T_a - T_{i1}) K_{BV} \int_0^t V_{BV} dt \quad (9)$$

όπου, T_{i1} και T_a είναι τα μετρούμενα φορτία της διεργασίας.

2.2.4. Προσομοίωση του εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής

Στο υποσύστημα αυτό η ελεγχόμενη θερμοκρασία εισόδου (πρωτεύουσα ροή) είναι η T_{i2} και η επιθυμητή θερμοκρασία διεργασίας στην έξοδο (δευτερεύουσα ροή) είναι η θερμοκρασία T_c . Ένα μοντέλο πρώτης τάξης είναι δυνατό να περιγράψει την λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας. Η διατύπωση του μοντέλου αυτού προκύπτει από τις εξισώσεις (1) και (2), ως εξής:

$$T_{i3} - T_{i2} = \lambda(T_o - T_e) \quad (10)$$

όπου λ είναι μετρήσιμος πειραματικός συντελεστής. Αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής είναι $T_c > T_{i2}$. Επομένως, το πρόβλημα ανάγεται σε έλεγχο της θερμοκρασίας T_{i2} στην έξοδο του εναλλάκτη ώστε να διατηρείται πάντοτε σε επίπεδο χαμηλότερο της θερμοκρασίας συμπίκνωσης T_c . Η συνθήκη αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση της κατάλληλης δικλείδας ροής.

Εφόσον ισχύει η εξίσωση (10) και εφόσον για τη βέλτιστη λειτουργία πρέπει να είναι $T_{i3} - T_o \rightarrow 0$, το κέρδος του μοντέλου πρέπει να είναι $K_{he} \cong \lambda$. Η σταθερά χρόνου της διεργασίας, η οποία εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα και την αντίσταση της θερμικής μεταφοράς των υλικών κατασκευής των αγωγών μεταφοράς, πρέπει να μετρηθούν πειραματικά. Επομένως, η εξίσωση (10) γράφεται:

$$T_c(s) = \frac{\lambda}{\tau_{he}s + 1} T_{i2}(s) + \frac{1}{\tau_{he}s + 1} w(s)$$

Στο πεδίο του χρόνου έχουμε:

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{he}} [-T_c(t) + \lambda T_{i2}(t) + w(t)] \quad (11)$$

όπου $w(t)$ είναι διαταραχή της λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας, η οποία σχετίζεται με την δυναμική της διεργασίας, δηλαδή, ενσωματώνει την επίδραση της διαφοράς μεταξύ του T_{i2} και T_c , και των θερμοκρασιών T_{i3} , T_o κλπ.

Από τις εξισώσεις (10) και (11) προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{he}} \left[-T_c(t) + w(t) + \lambda T_{i1} + \lambda(T_a - T_{i1})K_{BV} \int_0^t V_{BV} dt \right]$$

Ορίζοντας $K_{BV+he} = \lambda(T_a - T_{i1})K_{BV}$, ως το ολικό βήμα μεταβολής της δικλείδας ροής και του εναλλάκτη θερμότητας, προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{he}} \left[-T_c(t) + w(t) + \lambda T_{i1} + K_{BV+he} \int_0^t V_{BV} dt \right]$$

η οποία με τις αναγκαίες μετατροπές γράφεται:

$$T_c(s) = \frac{K_{BV+he}}{s(\tau_{he}s + 1)} V_{BV}(s) + \frac{1}{\tau_{he}s + 1} w(s) + \frac{\lambda}{\tau_{he}s + 1} T_{i1} \quad (12)$$

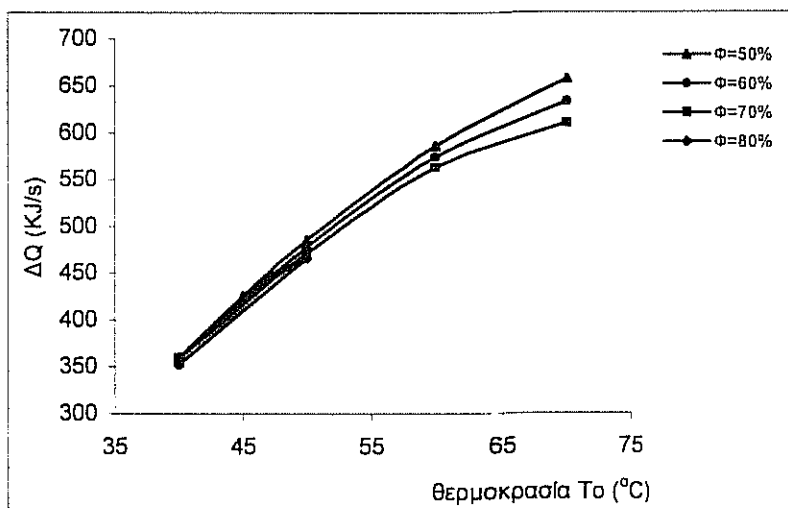
Η εξίσωση (12) περιγράφει μία ολική διεργασία δευτέρου βαθμού. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εφαρμογή τα $w(t)$ και T_{i1} αποτελούν διαταραχές της λειτουργίας του υποσυστήματος, οι οποίες μπορούν να αποσβεστούν με τη χρήση ενός ρυθμιστή PID.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για τον υπολογισμό της ποσότητας θερμότητας, η οποία μπορεί να ανακτηθεί με τη λειτουργία του συστήματος, που έχει περιγραφεί, επιλύθηκε το μοντέλο για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας (T_o) και σχετικής υγρασίας (Φ) του αέρα

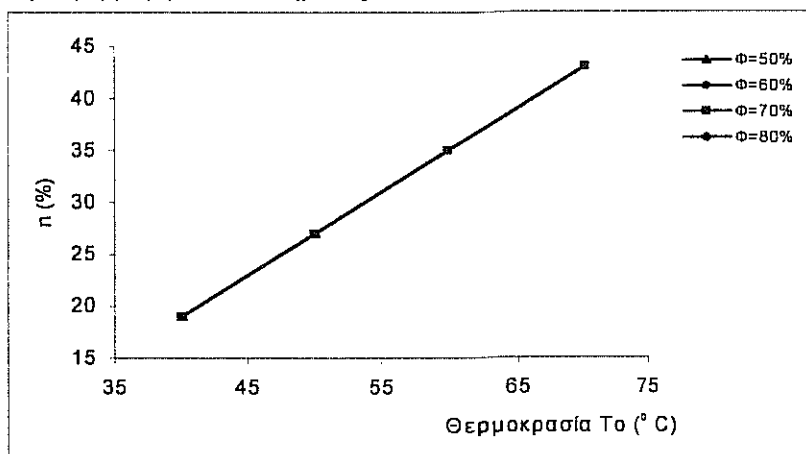
στην έξοδο του ξηραντηρίου. Η παροχή μάζας του αέρα ξήρανσης (m_d) υπολογίστηκε με σταθερή παροχή του ανεμιστήρα $14 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα και η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης στην είσοδο του ξηραντηρίου έχουν ληφθεί 15°C και 140°C , αντιστοίχως.

Η εξοικονόμηση ενέργειας ΔQ υπολογίστηκε από τη διαφορά της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης από T_a σε T_i και της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανσή του από T_b σε T_i , δηλαδή, $\Delta Q = m_d c_{pa} (T_a - T_b)$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Εξοικονομούμενη ενέργεια ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση ενέργειας ως ποσοστό της ολικής θερμότητας, η οποία θα είχε δαπανηθεί για την θέρμανση του αέρα ξήρανσης χωρίς την εφαρμογή του συστήματος.



Σχήμα 7. Ποσοστό εξοικονομούμενης ενέργειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας

Με εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος είναι φανερό ότι μπορούν να εξοικονομηθούν σημαντικές ποσότητες θερμότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι συνάρτηση κατά κύριο λόγο της θερμοκρασίας του εξερχόμενου αέρα από το ξηραντήριο. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα τόσο μεγαλύτερη είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι, σε χαμηλές θερμοκρασίες του εξερχόμενου αέρα η σχετική υγρασία δεν έχει σημαντική επίδραση στην εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μεγαλύτερη όσο η σχετική υγρασία αυξάνεται. Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας ως ποσοστό της ολικής θερμότητας, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 7, φαίνεται ότι είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας του εξερχόμενου αέρα. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 18-45%. Τα μεγαλύτερα ποσοστά αντιστοιχούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ανεξάρτητα από τη σχετική υγρασία (οι καμπύλες που αντιστοιχούν στα τέσσερα επίπεδα σχετικής υγρασίας συμπίπτουν).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σημαντικές ποσότητες ενέργειας μπορούν να εξοικονομηθούν με τη χρήση δύο εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι παρεμβάλλονται στο κύκλωμα ροής μάζας του αέρα ξήρανσης, στον οποίο αναμιγνύεται ατμοσφαιρικός αέρας με τριοδική ηλεκτροβόνα ροής. Η ρύθμιση των θερμοκρασιών στην είσοδο και έξοδο των εναλλακτών και της αναλογίας μίξης των μαζών γίνεται με σύστημα αυτομάτου ελέγχου της λειτουργίας του όλου συστήματος. Για τη λειτουργία του συστήματος πρέπει να προκαθορισθούν οι επιθυμητές τιμές της θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης T_i και της παροχής m_a , οι οποίες εξαρτώνται από το ξηραίνόμενο υλικό και αποτελούν τις βασικές παραμέτρους των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης. Το προτεινόμενο σύστημα είναι προσαρμόσιμο σε κάθε τύπο ξηραντηρίου. Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης στην είσοδο του ξηραντηρίου είναι 140 °C, μπορεί να εξοικονομηθεί το 18 έως 45% της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση του αέρα. Το ποσοστό εξοικονόμησης εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του ξηραντηρίου.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

c_p	ειδική θερμότητα, υπό σταθερή πίεση	kJ/kgK
h	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	$\text{kJ/m}^2\text{sK}$
h_{fg}	λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης	kJ/kg
K_1, K_2	συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των εναλλακτών	$\text{kJ/m}^2\text{sK}$
K_e	βήμα μεταβολής της πηγής θερμότητας	kJ/K
K_{bv}	βήμα μεταβολής της δικλείδας ροής	V.s
K_{he}	βήμα μεταβολής του εναλλάκτη θερμότητας	-
K_{bv+he}	ολικό βήμα μεταβολής της δικλείδας ροής και του εναλλάκτη	-
m_a	παροχή μάζας προθερμαινόμενου αέρα στον εναλλάκτη	kg/s
m_e	παροχή μάζας μη προθερμαινόμενου αέρα στον εναλλάκτη	kg/s
m_d	παροχή μάζας του αέρα ξήρανσης	kg/s
η	ποσοστό εξοικονομούμενης ενέργειας	%

Q_{in}	εισερχόμενη ενέργεια για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης	kJ/s
ΔQ	ποσότητα εξοικονομούμενης ενέργειας	kJ/s
Φ	σχετική υγρασία	%
s	μεταβλητή Laplace	-
T	θερμοκρασία αέρα	K
T_c	θερμοκρασία συμπύκνωσης σε ορισμένη μερική πίεση ατμών	K
t_e	σταθερά χρόνου της πηγής θερμότητας	s
t_{he}	σταθερά χρόνου του εναλλάκτη θερμότητας	s
v_p	ταχύτητα ροής	m/s
V	παροχή όγκου του αέρα στην πηγή θερμότητας	m ³ /s
V_{bv}	τάση εισόδου στη δικλείδα ροής	V
V_{fan}	τάση εισόδου στον ανεμιστήρα	V
w	μεταβλητή της λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας	kg/kg
<i>Ελληνικοί συμβολισμοί</i>		
λ	θερμικός συντελεστής	decimal
ρ	πυκνότητα	kg/m ³
<i>Δείκτες</i>		
a	αέρας	
d	ολική μάζα του αέρα	
e	αέρας υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες	
i	κατάσταση του αέρα στην είσοδο του ξηραντηρίου ή των εναλλακτών	
o	κατάσταση του αέρα στην έξοδο του ξηραντηρίου	
p	σταθερά πίεσης	
v	αέρια φάση	
w	υγρή φάση	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kato, K., Jamashita, R., 1982, Re-use of the exhaust air of the drier III – Performance and energy flow of grain drier with heat pump using atmospheric and exhaust heat as heat source, J. Soc. Agric. Mach. Japan, 43(4)589-598.
2. Strumillo, C., Lopez-Cacicedo, C., 1987, Energy aspects in drying. In: Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker Inc. (A. Mujumdar, ed.) p.p. 823-862.
3. Moraitis, C.S., Akritidis, C.B., 1997, Energy saving in drying plants by partial recovery of the latent heat of the exhaust air. Drying Technology, 15(6-8) 1931-1940.
4. Press, H.W., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., 1992, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge.
5. Astrom, K.J., Hagglund, T., 1995, PID Controllers, 2nd ed., ISA Transactions of Research, Triangle Park, N.C.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΚΤΩ ΓΕΝΟΤΥΠΩΝ ΣΟΡΓΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Α. Νικολάου¹, Ε. Νάματοβ¹, Γ. Καβαδάκης¹, Κ. Τσιώτας¹,
Κ. Πανούτσου¹ και Ν. Δαναλάτος²**

¹ Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Τμήμα Βιομάζας, 19 χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι, Τηλ: +3016039900, Fax: +3016038006, email: nikolaou@cres.gr

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Πεδίον Άρεως, 38334 Βόλος, Τηλ: +3042174236, Fax: +3042174270, e-mail: danai@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη και παραγωγικότητα πέντε ποικιλιών σακχαρούχου σόργου (SOFRA, KORALL, COWLEY, KELLER, MN 1500) και τριών υβριδίων κυτταρινούχου σόργου (ABF 306, NK 506 και H 132) μελετήθηκε στην Κοπαίδα, το 1999. Ως παραγωγικότερη ποικιλία σακχαρούχου σόργου απεδείχθη η Keller (3,8 τόνοι Ξ.Ο./στρ), ακολουθούμενη από την Tracy (3,7 τόνοι Ξ.Ο./στρ). Εξίσου υψηλές αποδόσεις ξηρής ουσίας έδωσε το υβρίδιο H132 (3,7 τόνοι Ξ.Ο./στρ).

EVALUATION OF GROWTH AND PRODUCTIVITY OF EIGHT SORGHUM GENOTYPES FOR BIOMASS AND ENERGY

**A. Nikolaou¹, I. Namatov¹, G. Kavadakis¹, K. Tsiotas¹, C. Panoutsou¹
and N. Danalatos²**

¹ Center for Renewable Energy Sources, 19th km Marathonos Ave., 19009 Pikermi, Greece
Tel: +3016039900, Fax: +3016038006, e-mail: nikolaou@cres.gr

² University of Thessaly, School of Agriculture, Crop and Animal Production, Pedion Areos, 38344 Volos, Tel: +3042174236, Fax: +3042174270, e-mail: danai@uth.gr

ABSTRACT

The growth and productivity of five sweet sorghum varieties (SOFRA, KORALL, COWLEY, KELLER, MN 1500) and three fiber sorghum hybrids (ABF 306, NK 506 και H 132) was studied in Kopais, central Greece, in 1999. The most productive sweet sorghum variety was Keller (38 tonnes O.D.M./ha) followed by TRACY (37 t/ha). Fiber sorghum hybrid H 132, also performed similar yielding potential (37 t/ha).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σόργο είναι ένα ανοιξιότιπο C4 φυτό μικρής ημέρας, που προήλθε από τις τροπικές περιοχές. Τα καλλιεργούμενα είδη, υπό την κοινή επιστημονική ονομασία *Sorghum bicolor* (L.) Moench, κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- * *καρποδοτικό σόργο*: που καλλιεργείται για παραγωγή καρπού,
- * *σόργο σαρωθροποιίας*: για την κατασκευή σαρώθρων από τις μακριές διακλαδώσεις της ταξιανθίας του,
- * *σόργο του Σουδάν*: ως σανοδοτικό φυτό, (καθώς και υβρίδια σακχαρούχου σόργου και σόργου του Σουδάν, υπό την κοινή ονομασία *κυτταρινούχα σόργα*)
- * *σακχαρούχο σόργο*: που καλλιεργείται κυρίως εξ' αιτίας των γλυκών στελεχών του για παραγωγή σιροπιού [1].

Τα τελευταία χρόνια το εντεινόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή βιοκαυσίμων από ενεργειακές καλλιέργειες έφερε στο προσκήνιο το σόργο ως εναλλακτικό βιομηχανικό φυτό για παραγωγή βιοαιθανόλης (σακχαρούχο σόργο), χαρτοπολτού και οικοδομικών υλικών (κυτταρινούχο σόργο), κλπ.

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν πέντε ποικιλίες σακχαρούχου σόργου (SOFRA, KORALL, COWLEY, KELLER, MN 1500) και τρία υβρίδια κυτταρινούχου σόργου (ABF 306, NK 506 και H 132) όσον αφορά στην ανάπτυξη και την παραγωγικότητά τους, στην πεδιάδα της Κωπαΐδας, στην κεντρική Ελλάδα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Πέντε ποικιλίες σακχαρούχου σόργου και τρία υβρίδια κυτταρινούχου σόργου μελετήθηκαν σε πειραματικό αγρό στο αμμο-αργιλο-πηλώδες έδαφος της πεδιάδας της Κωπαΐδας, 100χλμ. ΒΑ της Αθήνας, στην κεντρική Ελλάδα.

Μελετήθηκαν οι παρακάτω γενότυποι:

Γενότυπος	Τύπος
SOFRA	Σακχαρούχο σόργο
KORALL	Σακχαρούχο σόργο
COWLEY	Σακχαρούχο σόργο
KELLER	Σακχαρούχο σόργο
MN 1500	Σακχαρούχο σόργο
ABF 306	Κυτταρινούχο σόργο
NK 506	Κυτταρινούχο σόργο
H 132	Κυτταρινούχο σόργο

Εφαρμόστηκε το εντελώς τυχαίοποιημένο πειραματικό σχέδιο με τρεις επαναλήψεις και μέγεθος πειραματικού τεμαχίου $3 \times 3,5 = 10,5 \text{ m}^2$.

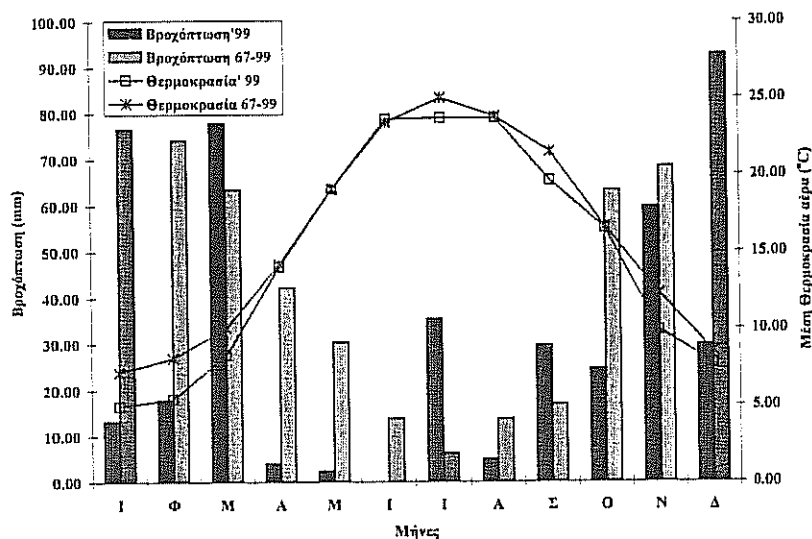
Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 17 Μαΐου με στόχο την επίτευξη πυκνότητας 11.000 φυτών/στρέμμα (αποστάσεις μεταξύ των γραμμών 70 cm και επί της γραμμής 13 cm). Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου εφαρμόστηκε άρδευση με σύστημα στάγδην

(συνολικό ύψος 415 mm) και αζωτούχος λίπανση 6 kg N/στρέμμα, 70 ημέρες μετά τη σπορά (26 Ιουλίου) με υδρολίπανση.

Σε κάθε γενότυπο, λαμβάνονταν μετρήσεις ύψους, αριθμού αδελφιών και αριθμού χλωρών και ξηρών φύλλων ανά φυτό, σε τρία φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο κάθε δεκαπέντε ημέρες. Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (170 ημέρες μετά τη σπορά) πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία μίας γραμμής φυτών μήκους ενός μέτρου σε κάθε πειραματικό τεμάχιο (συνολική έκταση 0,7 m²). Τα φυτά διαχωρίστηκαν σε στελέχη, φύλλα και ταξιανθίες και ζυγίστηκαν αμέσως μετά την κοπή ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση σε χλωρή βιομάζα. Κατόπιν, μετρήθηκε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας με τη συσκευή Mark 2 και δείγμα από φυτικά μέρη τοποθετήθηκε σε κλίβανο ξήρανσης στους 85 °C έως τη σταθεροποίηση του βάρους τους, για την εκτίμηση των αποδόσεων των γενοτύπων σε ξηρή ουσία.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Κλιματικά δεδομένα



Σχήμα 1. Μέση θερμοκρασία αέρα (°C) και βροχόπτωση (mm) το 1999 και μέσοι όροι για την περίοδο 1967 - 1999. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από το σταθμό του ΚΑΠΕ στα Βάγια Βοιωτίας, σε απόσταση 20 χλμ. από τον πειραματικό αγρό.

Τα κλιματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Μάιος – Οκτώβριος 1999) κυμάνθηκαν περί τις μέσες τιμές για την περιοχή. Το συνολικό ύψος βροχής ήταν 157 mm, με μια περίοδο ξηρασίας κατά τη διάρκεια του Ιουνίου έως και τα μέσα του Ιουλίου, όταν η μέση θερμοκρασία πλησίασε τις μέγιστες τιμές.

3.2 Ανάπτυξη

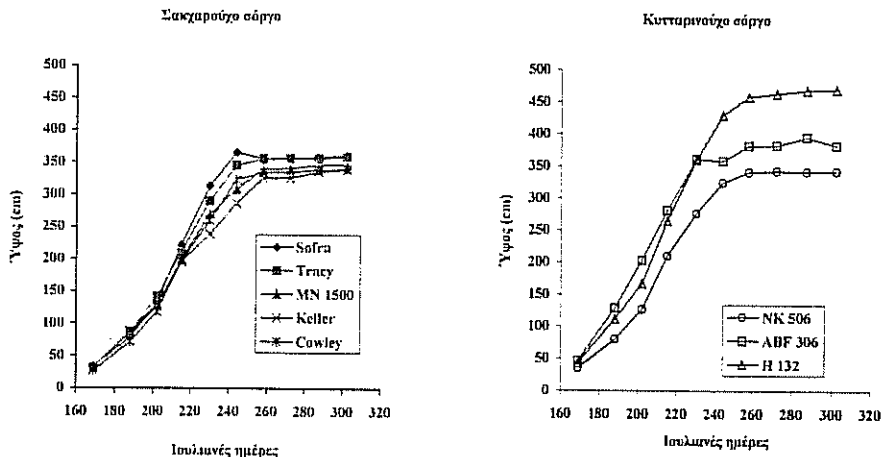
Μεταξύ όλων των υπό μελέτη γενοτύπων σόργου, πρωιμότερο ήταν το υβρίδιο κυτταρινούχου σόργου ABF 306 στο οποίο το 50% της άνθησης παρατηρήθηκε στις 11 Αυγούστου. Ακολούθησαν η ποικιλία SOFRA και το υβρίδιο NK 506 στα οποία το 50% των φυτών άνθισε στις 25 Αυγούστου. Η πιο όψιμη ποικιλία ήταν η MN 1500 η οποία άνθισε στις 15 Σεπτεμβρίου.

Πίνακας 1. Ημερομηνίες άνθησης των γενοτύπων το 1999.

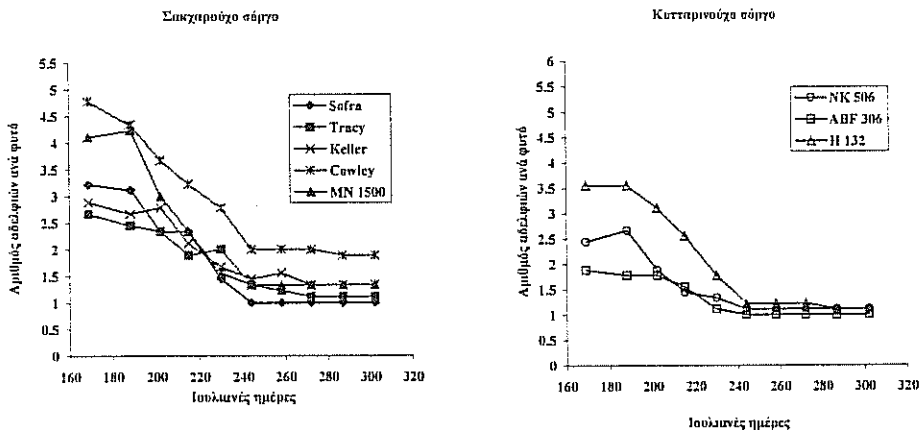
Ποικιλία	Ημερομηνία άνθησης
ABF 306 (κσ)	11/8
SOFRA (σσ)	25/8
NK 506 (κσ)	25/8
TRACY (σσ)	1/9
COWLEY (σσ)	1/9
H 132 (κσ)	8/9
KELLER (σσ)	8/9
MN 1500 (σσ)	15/9

σσ: σακχαρούχο σόργο, κσ: κυτταρινούχο σόργο

Η εξέλιξη του ύψους ήταν παρόμοια σε όλες τις ποικιλίες σακχαρούχου σόργου, με μέσο ρυθμό αύξησης τα 4 cm/ημέρα μέχρι το τέλος Αυγούστου (244 Ιουλιανή ημέρα). Το τελικό ύψος κυμάνθηκε μεταξύ των 340 cm (KELLER) και των 360 cm (SOFRA). Ο αντίστοιχος ρυθμός αύξησης για τα κυτταρινούχα υβρίδια κυμάνθηκε μεταξύ 3,9 cm/ημέρα (NK 506) και 5,1 cm/ημέρα (ABF 306 και H 132). Το πιο ζωντανό υβρίδιο ήταν το H 132 που έφθασε τα 470 cm, ενώ στα NK 506 και ABF 306 τα τελικά ύψη ήταν 342 cm και 383 cm, αντίστοιχα.

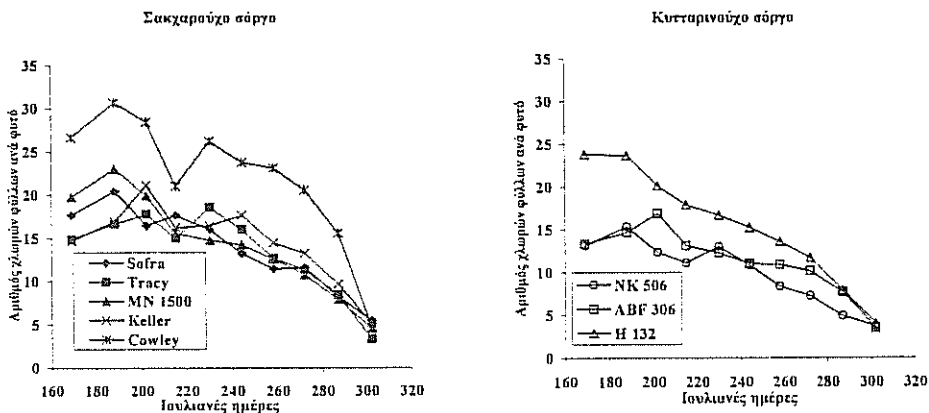


Σχήμα 2. Ύψος φυτείας των ποικιλιών σακχαρούχου (αριστερά) και κυτταρινούχου (δεξιά) σόργου κατά την καλλιεργητική περίοδο (1999).



Σχήμα 3. Αριθμός αδελφιών ανά φυτό των ποικιλιών σακχαρούχου (αριστερά) και κυτταρινούχου (δεξιά) σόργου κατά την καλλιεργητική περίοδο (1999).

Η ιδιότητα του αδελφώματος των σιτηρών έχει μεγάλη πρακτική σημασία καθώς με το αδελφώμα είναι δυνατό να αντισταθμιστεί το πενιχρό φύτεμα ή η προσβολή της καλλιέργειας από ασθένειες, έντομα ή άλλες αιτίες [2]. Μεταξύ των ποικιλιών σακχαρούχου σόργου, η COWLEY και η MN 1500, είχαν περισσότερα από 3 αδελφια/φυτό έως τις αρχές Αυγούστου (3,7 και 3,1 αντίστοιχα). Οι υπόλοιπες ποικιλίες σακχαρούχου σόργου δεν ξεπέρασαν τα 2,5 αδελφια/φυτό και κυμάνθηκαν μεταξύ 1,7 για την TRACY και 2,2 για την SOFRA. Ο αριθμός των αδελφιών ανά φυτό μειώθηκε σταδιακά έως τα μέσα του Σεπτεμβρίου σε όλες τις ποικιλίες και σταθεροποιήθηκε στα 2 για την COWLEY και το 1 για τις υπόλοιπες ποικιλίες σακχαρούχου σόργου.

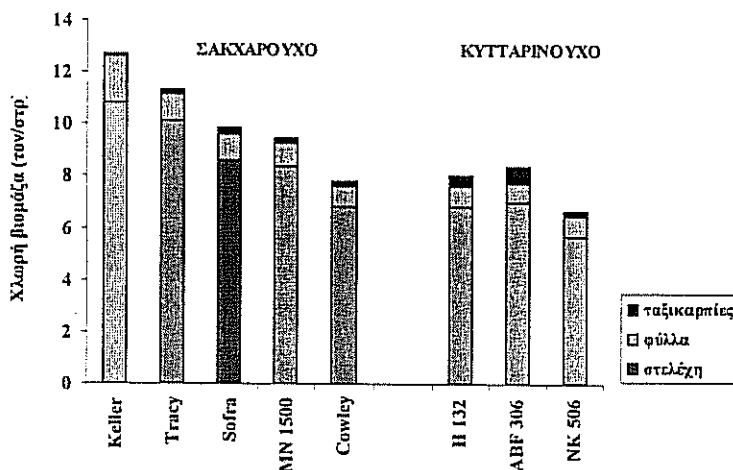


Σχήμα 4. Αριθμός χλωρών φύλλων ανά φυτό, των ποικιλιών σακχαρούχου (αριστερά) και κυτταρινούχου (δεξιά) σόργου κατά την καλλιεργητική περίοδο (1999).

Όσον αφορά στα υβρίδια κυτταρινούχου σόργου, η μεγαλύτερη τιμή αδελφιών ανά φυτό παρατηρήθηκε στο Η 132 (3,5 αδελφια/φυτό μεταξύ 7 και 22 Ιουλίου). Οι αντίστοιχες τιμές για τα NK 506 και ABF 306 ήταν 2,7 και 1,9. Κατά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, ο μέσος αριθμός αδελφιών ανά φυτό για όλα τα υβρίδια κυτταρινούχου σόργου ήταν 1.

Σε όλες τις ποικιλίες σακχαρούχου σόργου ο μέγιστος αριθμός χλωρών φύλλων παρατηρήθηκε στην περίοδο μεταξύ 7 και 22 Ιουλίου (183 – 202 Ιουλιανή ημέρα). Η ποικιλία COWLEY παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή φύλλων φθάνοντας τα 31 φύλλα/φυτό στις αρχές του Ιουλίου, αποτέλεσμα του μεγαλύτερου αριθμού αδελφιών ανά φυτό. Ο μέγιστος αριθμός φύλλων για τις υπόλοιπες ποικιλίες σακχαρούχου σόργου κυμάνθηκε μεταξύ 18 φύλλων/φυτό (TRACY) και 23 φύλλων/φυτό (SOFRA). Όσον αφορά στα υβρίδια κυτταρινούχου σόργου τα περισσότερα φύλλα παρατηρήθηκαν στο υβρίδιο Η 132 (24 χλωρά φύλλα/φυτό στις 7 Ιουλίου) και ακολούθησαν τα ABF 306 (17 χλωρά φύλλα/φυτό στις 22 Ιουλίου) και NK 506 (15 χλωρά φύλλα/φυτό στις 7 Ιουλίου).

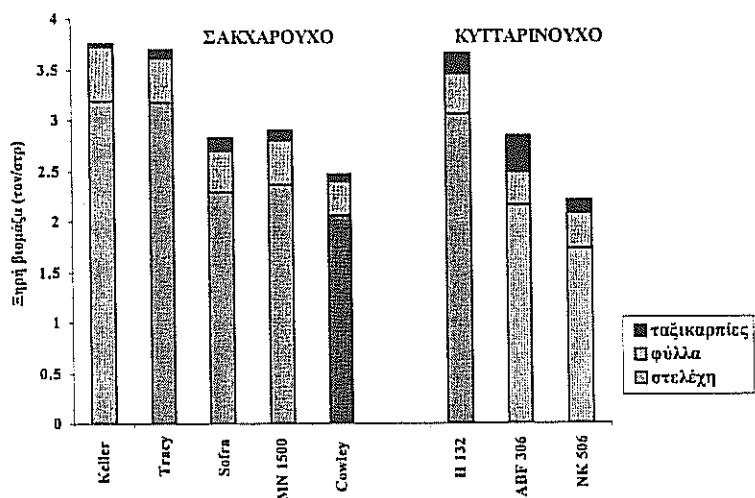
3.3 Παραγωγικότητα



Σχήμα 5. Τελικές αποδόσεις σε χλωρή βιομάζα των ποικιλιών σακχαρούχου και κυτταρινούχου σόργου (Οκτώβριος 1999).

Η παραγωγικότερη ποικιλία σακχαρούχου σόργου ήταν η KELLER (11,5 τόνοι χλωρής βιομάζας/στρ) ακολουθούμενη από την TRACY (10,5 τον/στρ) και την MN 1500 (9,7 τον/στρ). Μεταξύ των υβριδίων κυτταρινούχου σόργου το Η 132 έδωσε επίσης υψηλές αποδόσεις (9,9 τον/στρ) ενώ τα ABF 306 και NK 506 δεν ξεπέρασαν τους 8 τον/στρ.

Οι KELLER και TRACY ήταν οι παραγωγικότερες ποικιλίες σακχαρούχου σόργου και σε ξηρή βιομάζα, δίνοντας αποδόσεις πάνω από 3 τον/στρ (3,9 τον/στρ και 3,7 τον/στρ αντίστοιχα). Εξίσου παραγωγικό ήταν το υβρίδιο κυτταρινούχου σόργου Η 132 με απόδοση 3,7 τον/στρ.



Σχήμα 6. Τελικές αποδόσεις ξηρής βιομάζας των ποικιλιών σακχαρούχου και κυτταρινούχου σόργου (Οκτώβριος 1999).

3.5 Πλάγιασμα

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την καλλιέργεια του σόργου και ιδιαίτερα του σακχαρούχου είναι το πλάγιασμα. Οι σχετικά δυνατοί άνεμοι που πνέουν κατά την περίοδο του Αυγούστου σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ταξιανθίας που προσθέτει ανομοιόμορφο βάρος στην κορυφή οδηγούν στο πλάγιασμα των φυτών με άμεσες συνέπειες τη μείωση των τελικών αποδόσεων και τη δυσκολία στη μηχανική συλλογή.

Πίνακας 2. Ποσοστό πλαγιασματος για κάθε γονότυπο σόργου.

Γονότυπος	Ποσοστό πλαγιασματος (%)
ABF 306 (κσ)	0
SOFRA (σσ)	67
NK 506 (κσ)	0
TRACY (σσ)	0
COWLEY (σσ)	33
H 132 (κσ)	0
KELLER (σσ)	33
MN 1500 (σσ)	67

σσ: σακχαρούχο σόργο, κσ: κυτταρινούχο σόργο

Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου εκτιμήθηκε το ποσοστό των πλαγιασμένων φυτών σε κάθε πειραματικό τεμάχιο και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2. Κανένα υβρίδιο κυτταρινούχου σόργου δεν πλάγιασε ενώ από τις ποικιλίες σακχαρούχου σόργου η πιο ανθεκτική στο πλάγιασμα ήταν η TRACY, η οποία δεν πλάγιασε σε κανένα πειραματικό

τεμάχιο. Από τις υπόλοιπες ποικιλίες σακχαρούχου σόργου, πλάγιασμα παρατηρήθηκε στο 67% των φυτών για τις ποικιλίες SOFRA και MN 1500 και στο 33% για τις ποικιλίες KELLER και COWLEY.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα έγινε φανερό ότι μεταξύ των πέντε ποικιλιών σακχαρούχου σόργου παραγωγικότερη ήταν η Keller (3,8 τον/στρ σε ξηρή βιομάζα), ακολουθούμενη από την Tracy (3,7 τον/στρ). Το υβρίδιο κυτταρινούχου σόργου H132, έδωσε επίσης υψηλές αποδόσεις (3,7 τον/στρ), ενώ τα άλλα δύο υβρίδια δεν ξεπέρασαν τους 3 τον/στρ (ABF 306, 2,8 τον/στρ και NK 506, 2,2 τον/στρ).

Με μέση θερμογόνο δύναμη βιομάζας 0,4 τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου (ΤΙΠ)/τόνο ξηράς ουσίας [3], όλοι οι γονότυποι σακχαρούχου και κυτταρινούχου σόργου θα μπορούσαν να αποδώσουν πάνω από 0,8 ΤΙΠ/στρ, με τους παραγωγικότερους γονοτύπους σακχαρούχου (KELLER, TRACY) και κυτταρινούχου (H 132) σόργου να δίνουν πάνω από 1,4 ΤΙΠ/στρ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε εν μέρη από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος FAIR (FAIR 3 CT 96 1913: Environmental studies on sweet and fiber sorghum, sustainable crops for biomass and energy) [4] και από το Υπουργείο Ανάπτυξης.

Ευχαριστούμε θερμά τον κύριο Κωνσταντίνο Ραχούτη για την πολύτιμη συνεισφορά του κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dalianis, C. D., 1996. Adaptation, productivity and agronomic aspects of sweet sorghum under EU conditions, *Proc. Of the First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry*, France, 15-25.
2. Δαλιάνης, Κ., Χειμερινά σιτηρά, Αθήνα, 1983.
3. Dolcioti, I., Mambelli, S., Grandi, S., and Venturi, G., 1996. Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production, *Industrial Crops and Products*, 7, 265-272.
4. Panoutsou, C., Kavarakis, G., Namatov, I., Natioti, H., Nikolaou, A., Thiveou H., Tsiotas K., and Danalatos, N., 2000. Environmental studies on sweet and fiber sorghum sustainable crops for biomass and energy, FAIR-3-CT96-1913, 3rd annual report, CRES Biomass Dept.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΑΚΧΑΡΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ (cv. Keller) ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

Γ. Καβαδάκης¹, Α. Νικολάου¹, Ε. Αλεξοπούλου¹, Ε. Νατιώτη¹, Χ.
Μήτσιου³, Κ. Πανούτσου¹ και Ν. Δαναλάτος².

¹ Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Τμήμα Βιομάζας, 19 χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι, Τηλ:
+3016039900, Fax:+3016038006, email: kabadaki@cres.gr

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Πεδίον Άρεως, 38334 Βόλος,
Τηλ: +3042174236, Fax: +3042174270, e-mail: danal@uth.gr

³ Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, 11855
Αθήνα, Τηλ: +3015294005, Fax:+3015294015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετήθηκε η αύξηση, ανάπτυξη και παραγωγικότητα σε βιομάζα και σάκχαρα επίσορης καλλιέργειας γλυκού σόργου [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], ποικιλία Keller κάτω από δύο επίπεδα άρδευσης και τρία επίπεδα λίπανσης. Το ύψος, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και οι αποδόσεις σε χλωρή και ξηρή βιομάζα επηρεάστηκαν μόνο από τα διαφορετικά επίπεδα λίπανσης. Η συνολική βιομάζα κυμάνθηκε από 2,5 έως 3,7 τόνους Ξ.Ο/στρ, ενώ το ποσοστό σακχάρων στα στελέχη έφθασε το 11% της χλωρής βιομάζας, ανεξαρτήτως λίπανσης.

GROWTH, PRODUCTIVITY AND SUGAR YIELDS OF SWEET SORGHUM (cv. Keller) IN CENTRAL GREECE

G. Kavadakis, A. Nikolaou¹, E. Alexopoulou¹, H. Natioti¹, C. Mitsiou³,
C. Panoutsou¹ and N. Danalatos².

¹ Center for Renewable Energy Sources, 19th km Marathonos Ave., 19009 Pikermi, Greece
Tel:+3016039900, Fax:+3016038006, e-mail: kabadaki@cres.gr

² University of Thessaly, School of Agriculture, Crop and Animal Production, Pedion Areos, 38344 Volos, Tel:
+3042174236, Fax: +3042174270, e-mail: danal@uth.gr

³ Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Reclamation and Agricultural Engineering,
11855 Athens, Tel:+3015294005, Fax:+3015294015

Summary

Growth, productivity and sugar yields of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], cv. Keller was studied under two irrigation and three fertigation rates. Height, LAI, fresh and dry biomass yields were affected only by the different fertilisation rates. Dry matter yields ranged from 25 t/ha (unfertilised plots) to 37 t/ha (fertilised plots), whereas sugar content in stems reached up to 11% of fresh biomass in all treatments.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γλυκό σόργο είναι ένα ετήσιο C_4 φυτό που χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς φωτοσύνθεσης και μεγάλο ποσοστό σακχάρων στα στελέχη, καλά προσαρμοσμένο στις ημιτροπικές και εύκρατες περιοχές [1,2]. Τα ζυμώσιμα σάκχαρα που περιέχονται στα στελέχη είναι κατάλληλα για παραγωγή βιοαιθανόλης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στις μεταφορές.

Τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί το ενδιαφέρον για την καλλιέργεια του γλυκού σόργου ως ενεργειακό φυτό, σε ευρωπαϊκό (προγράμματα AIR, FAIR, κλπ.) και σε διεθνές επίπεδο.

Το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα πλαίσια συμμετοχής του σε εθνικά και ευρωπαϊκά ερευνητικά έργα για το σόργο, έχει εγκαταστήσει πειραματικούς αγρούς σε πολλές περιοχές της Ελλάδας.

Όμως σε όλους τους σχετικούς πειραματικούς αγρούς, τα επίπεδα της αζωτούχου λίπανσης δεν έδωσαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην παραγωγικότητα, γεγονός που αποδόθηκε στις πιθανώς χαμηλές απαιτήσεις του φυτού σε αζωτούχο λίπανση και στην υπερβολική λίπανση που είχε προηγηθεί στους αγρούς που διεξήχθησαν τα πειράματα [1,7,8].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης χρονιάς ενός πειράματος επίσπορης καλλιέργειας της ποικιλίας γλυκού σόργου cv. Keller στην Κεντρική Ελλάδα, όπου ελέγχοντας την υπολειμματική δράση του αζώτου μελετήθηκε η αύξηση, η ανάπτυξη και η παραγωγικότητα σε χλωρή και ξηρή βιομάζα καθώς και η περιεκτικότητα των στελεχών σε σάκχαρα στις εδαφοκλιματικές συνθήκες της περιοχής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο πειραματικός αγρός βρίσκεται στα Βάγια Βοιωτίας. Πλήρη μετεωρολογικά δεδομένα (μέση, ελάχιστη, μέγιστη θερμοκρασία, σχετική υγρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου και βροχόπτωση) καταγράφονταν σε ωριαία βάση από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκαταστάθηκε στον πειραματικό αγρό.

Το πειραματικό σχέδιο ήταν τυχαιοποιημένες πλήρεις ομάδες με τρεις επαναλήψεις όπου μελετήθηκε η επίδραση δύο διαφορετικών επιπέδων στάγδην άρδευσης ($I_1=240$ mm, $I_2=320$ mm) και τριών επιπέδων λίπανσης ($F_1=0$ kg N/στρ., $F_2=6$ kg N/στρ. και $F_3=12$ kg N/στρ.) στην ανάπτυξη, στην παραγωγικότητα και στην περιεκτικότητα σακχάρων στα στελέχη. Πρέπει να σημειωθεί ότι το 1999 ήταν η δεύτερη συνεχής χρονιά που διεξαγόταν το ίδιο πείραμα στην ίδια τοποθεσία, με αποτέλεσμα να έχει ελαχιστοποιηθεί η υπολειμματική δράση του N από τις προηγούμενες λιπάνσεις, στον μάρτυρα. Το μέγεθος του πειραματικού τεμαχίου ήταν $10 \times 11 = 220$ m. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 4 Ιουνίου, η λίπανση στις 22 Ιουλίου, ενώ η διαφοροποίηση της άρδευσης στις 27 Ιουλίου 1999.

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Ιούνιος - Νοέμβριος 1999) πραγματοποιήθηκαν οκτώ δειγματοληψίες (κοπές) ώστε να μελετηθεί η πορεία ανάπτυξης (*growth analysis*) του φυτού, ενώ στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου

πραγματοποιήθηκε τελική συγκομιδή 24 m² ανά πειραματικό τεμάχιο. Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν στο ύψος, στο δείκτη φυλλικής επιφάνειας, στη χλωρή και ξηρή βιομάζα και τέλος στην περιεκτικότητα σακχάρων στα στελέχη. Για τον προσδιορισμό της ξηρής ουσίας, δείγματα από στελέχη, φύλλα και ταξιανθίες ξηραίνονταν σε κλίβανο στους 85 °C, έως τη σταθεροποίηση του βάρους τους. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη συσκευή Mark 2 Area Meter. Οι αναλύσεις για τον προσδιορισμό του ποσοστού σακχάρων πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο DNS.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Κλιματολογικά δεδομένα

Στον Πιν. 1 συνοψίζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα (μέγιστη, ελάχιστη και μέση, σε °C) και βροχόπτωσης (σε mm/μήνα) κατά την καλλιεργητική περίοδο, σε σύγκριση με τις μέσες κλιματολογικές τιμές της περιοχής.

Πίνακας 1. Μετεωρολογικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

Μήνας	Τμέση °C	Τμεγ. °C	Τελάχ. °C	Βροχόπτωση (mm)
Μάιος	19,1 (19,1)*	24,9 (26,0)	12,9 (12,2)	2 (30)
Ιούνιος	23,6 (23,4)	30,0 (30,8)	16,3 (16,0)	0 (14)
Ιούλιος	23,7 (25,0)	30,0 (32,2)	16,8 (17,8)	35 (6)
Αύγουστος	23,7 (23,8)	31,2 (30,7)	16,0 (17,3)	5 (14)
Σεπτέμβριος	19,6 (21,5)	26,2 (28,5)	13,7 (14,5)	30 (17)
Οκτώβριος	16,5 (16,6)	22,9 (22,4)	10,65 (10,9)	25 (63)
Νοέμβριος	9,9 (12,1)	13,7 (17,1)	6,25 (7,0)	60 (68)

* σε παρενθέσεις οι μέσες τιμές 30ετίας για την περιοχή.

Όπως φαίνεται στον Πιν. 1, οι θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν κατά την καλλιεργητική περίοδο ήταν αντιπροσωπευτικές αυτών της τελευταίας 30ετίας για την περιοχή της μελέτης. Σημαντικές διακυμάνσεις παρατηρούνται ως προς τη βροχόπτωση με πρακτικά μηδενικές τιμές τους μήνες Μάιο και Ιούνιο 1999, ενώ σημαντική βροχόπτωση σημειώθηκε τον Ιούλιο (35 mm, Πιν.1). Αρκετά ξηρός ήταν και ο Οκτώβριος με 24 mm αντί για 63 mm βροχής σε μία μέση χρονιά.

3.2 Αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας

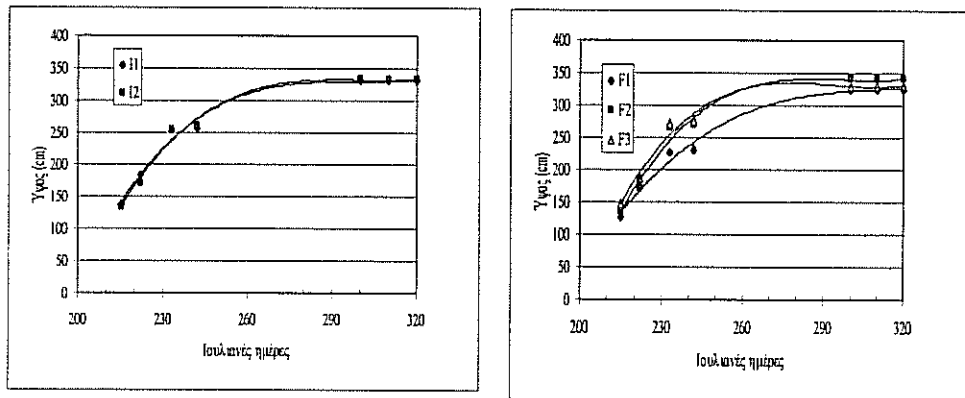
Ύψος

Το ύψος της καλλιέργειας επηρεάστηκε σημαντικά ($P=0,05$) μόνο από τα διαφορετικά επίπεδα λίπανσης. Η διαφοροποίηση παρουσιάστηκε περίπου 30 ημέρες μετά τη λίπανση (233 LH) και ήταν καθόλη τη διάρκεια της περιόδου στατιστικά σημαντική μεταξύ των λιπασμένων τεμαχίων και του μάρτυρα.

Πιο συγκεκριμένα, τα φυτά στα λιπασμένα τεμάχια είχαν τον ίδιο περίπου ρυθμό ανάπτυξης (7,2 και 6,9 cm/ημέρα για τα F₃ και F₂, αντίστοιχα) μέχρι την αρχή της άνθησης, ενώ τα φυτά του μάρτυρα αναπτύχθηκαν με ρυθμούς 5,6 cm/ημέρα.

Το τελικό ύψος ήταν 3,3, 3,4 και 3,25 m για τις μεταχειρίσεις F₃, F₂ και F₁ αντίστοιχα.

Το ύψος δεν επηρεάστηκε σημαντικά ($P=0,05$) από την άρδευση, προφανώς λόγω της αργοπορημένης διαφοροποίησής της (27 Ιουλίου).

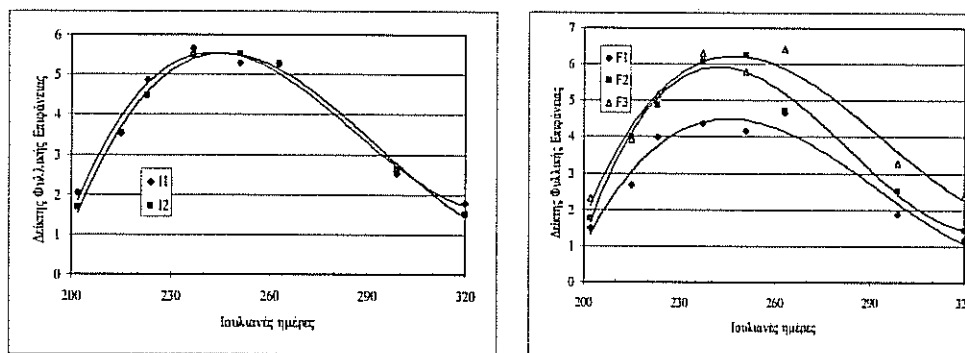


Σχήμα 1. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στο ύψος του φυτού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε ορισμένα τμήματα των πειραματικών τεμαχίων παρατηρήθηκε πλάγιασμα των φυτών που οφειλόταν σε δυνατή βροχόπτωση που έπεσε κατά την 1 Σεπτεμβρίου όταν τα φυτά είχαν ξεπεράσει τα 2,5 μ. ύψος καθώς επίσης και στην εφαρμογή στάγδην άρδευσης που πιθανώς οδήγησε στη δημιουργία πιο επιφανειακού ριζικού συστήματος.

Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας

Υψηλότεροι ρυθμοί αύξησης της φυλλικής επιφάνειας παρατηρήθηκαν στις μεταχειρίσεις με λίπανση σε σύγκριση με τον μάρτυρα, αμέσως μετά την εφαρμογή της λίπανσης. Η ανώτερη τιμή που παρατηρήθηκε για τα λιπασμένα τεμάχια ήταν περίπου 6,2 (κατά την αρχή της άνθησης), ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα μη λιπασμένα τεμάχια ήταν 4,4. Μετά από το σημείο αυτό, μία σταδιακή μείωση της φυλλικής επιφάνειας παρατηρήθηκε, η οποία

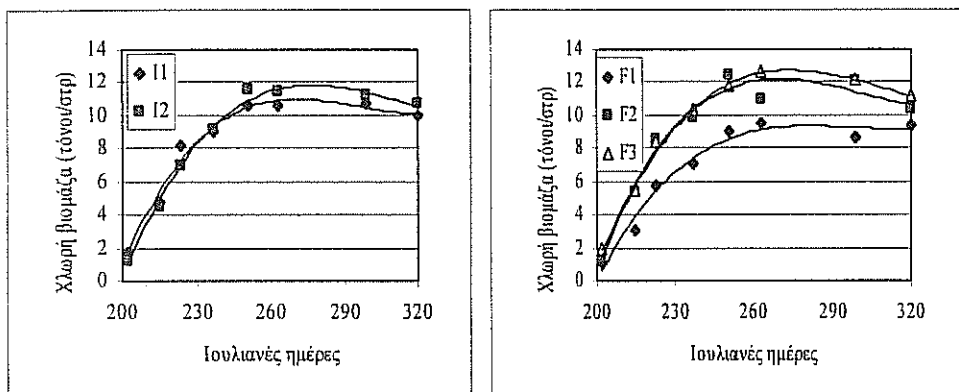


Σχήμα 2. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στο δείκτη φυλλικής επιφάνειας γλυκού σόργου cv. Keller κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

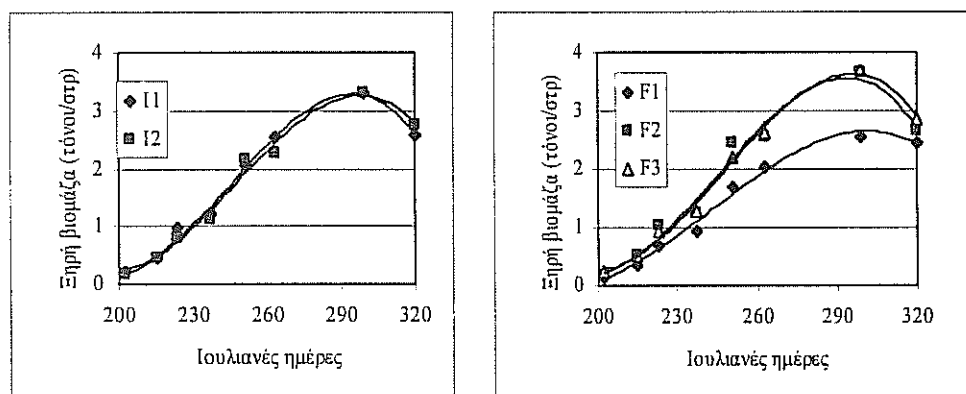
ήταν μάλλον ταχύτερη για τα 2 λιγότερο λιπασμένα τεμάχια. Οι τελικές τιμές (320 Ι.Μ) ήταν 2,4, 1,4 και 1,2 για τα F₃, F₂ και F₁ τεμάχια, αντίστοιχα.

Όσον αφορά την άρδευση, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας δεν επηρεάστηκε από αυτή. Οι ίδιες μέγιστες τιμές (5,6) παρατηρήθηκαν κατά την αρχή της άνθησης και στα δύο επίπεδα άρδευσης.

Χλωρή και Ξηρή Βιομάζα



Σχήμα 3. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στη χλωρή βιομάζα γλυκού σόργου εν. Keller κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).



Σχήμα 4. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στη ξηρή βιομάζα γλυκού σόργου εν. Keller κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

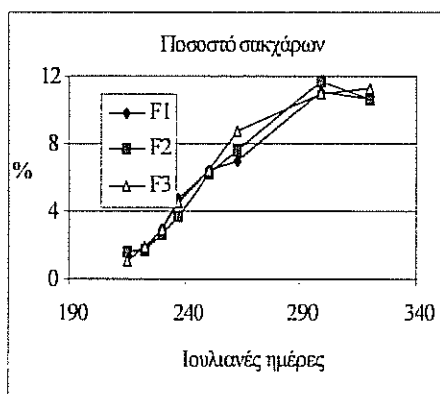
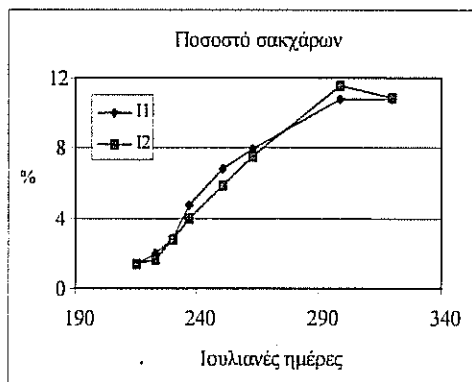
Ο ρυθμός αύξησης σε χλωρή βιομάζα στα πειραματικά τεμάχια με λίπανση ήταν υψηλότερος (240 kg/στρ./ημέρα) σε σχέση με τα τεμάχια του μάρτυρα (170 kg/στρ./ημέρα), από το φύτερωμα έως την αρχή της άνθησης

Οι αποδόσεις σε χλωρή βιομάζα στα λιπασμένα τεμάχια έφθασαν τους 12 τον/στρ. στο τέλος Οκτωβρίου, έναντι 8,5 τον/στρ. για το μάρτυρα.

Η επίδραση της λίπανσης στις αποδόσεις σε ξηρή ουσία ήταν στατιστικά σημαντική, με τα λιπασμένα πειραματικά τεμάχια να καταγράφουν στατιστικά μεγαλύτερες αποδόσεις από το μάρτυρα (3,7, 3,6 και 2,5 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα, αντίστοιχα) περί το τέλος Οκτωβρίου. Μετά την ημερομηνία αυτή, μία μεγάλη μείωση σε ξηρή ουσία παρατηρήθηκε στα λιπασμένα πειραματικά τεμάχια, έτσι ώστε στο τέλος Νοεμβρίου οι αποδόσεις τους να είναι παρόμοιες με αυτές του μάρτυρα (2,5 τόνου/στρ.). Αυτή η μείωση θεωρείται ότι οφείλεται αφενός μεν στη γήρανση και πτώση των φύλλων, που στα λιπασμένα φυτά είναι περισσότερα και αφετέρου στη συνδυασμένη επίδραση, στην προχωρημένη αυτή χρονική περίοδο του φθινοπώρου, της μικρής συσσώρευσης θρεπτικών στοιχείων και αυξημένου ρυθμού αναπνοής των φυτών, λόγω μεγαλύτερης βιομάζας.

Τέλος, όσον αφορά την άρδευση, οι διαφορές στις αποδόσεις δεν ήταν στατιστικά σημαντικές (περίπου 3,3 τόνοι ξηράς ουσίας ανά στρέμμα και για τα δύο επίπεδα άρδευσης).

3.3 Περιεκτικότητα σε σάκχαρα

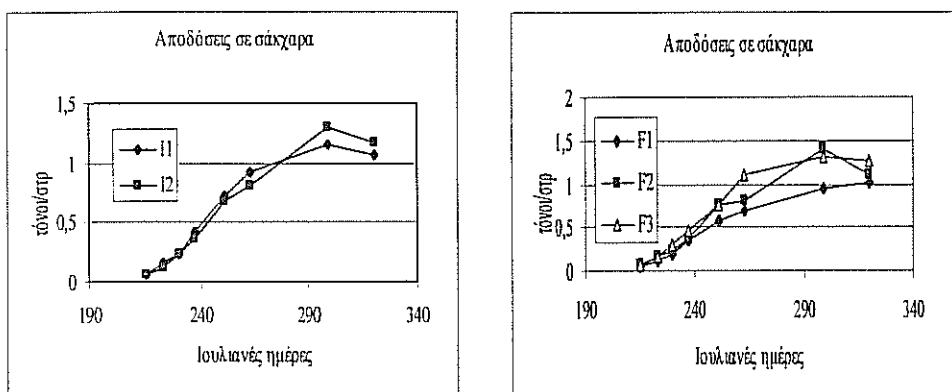


Σχήμα 5. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στο ποσοστό σακχάρων γλυκού σόργου cv. Keller κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 5, το ποσοστό των σακχάρων στα στελέχη (χλωρή βιομάζα) δεν επηρεάστηκε από την άρδευση και τη λίπανση. Οι μέγιστες τιμές παρουσιάστηκαν κατά το τέλος Οκτωβρίου και έφθασαν το 11,5%.

Οι αποδόσεις σε σάκχαρα κυμάνθηκαν από 1,0-1,3 τόνους ανά στρέμμα ανάλογα με το επίπεδο λίπανσης. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στις διαφορετικές αποδόσεις σε χλωρή βιομάζα αναλόγως του επιπέδου λίπανσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι 1 kg σακχαρόζης αποδίδει 538 g αιθανόλης [3,4], οι θεωρητικές αποδόσεις σε αιθανόλη κυμαίνονται από 538-700 kg/στρ. ή 648-843 λίτρα/στρ. ($M.B_{aw} = 0,83 \text{ kg/l}$)[5].



Σχήμα 6. Επίδραση δύο επιπέδων άρδευσης (αριστερά) και τριών επιπέδων λίπανσης (δεξιά) στις αποδόσεις σακχάρων γλυκού σόργου εν. Keller κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (1999).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα η άρδευση δεν επηρέασε κανένα από τα μετρούμενα μεγέθη (ύψος, φυλλική επιφάνεια, παραγωγικότητα και ποσοστό σακχάρων). Αυτό αποδίδεται στη σχετικά καθυστερημένη εγκατάσταση της φυτείας (επίσπορη) και ενδεχομένως στη μικρή διαφορά του συνολικού αρδευτικού νερού μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων.

Αντίθετα, η επίδραση της λίπανσης ήταν σημαντική τόσο στις αποδόσεις σε βιομάζα όσο και στην παραγωγή σακχάρων. Αυτό βρίσκεται σε αντιδιαστολή με αποτελέσματα προηγούμενων πειραμάτων λίπανσης, όπου δε φάνηκε σημαντική επίδραση της Ν-ουχου λίπανσης, προφανώς λόγω της υπολειμματικής δράσης του στοιχείου από τα προηγούμενα έτη.

Οι μέγιστες αποδόσεις σε βιομάζα και σάκχαρα που αποτελούν την πρώτη ύλη για παραγωγή αιθανόλης παρατηρήθηκαν κατά το τέλος Οκτωβρίου, ενώ στη συνέχεια μειώθηκαν και επομένως ως καταλληλότερη εποχή συγκομιδής φαίνεται να είναι αυτή του Οκτωβρίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σόργο συγκρινόμενο με άλλα φυτά (πιν. 2) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αιθανόλης, όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα (648-843 λίτρα/στρ., για 0-12 kg N/στρ) δίνει τις μεγαλύτερες αποδόσεις, απαιτώντας ταυτόχρονα τις μικρότερες ποσότητες αζώτου, γεγονός που το καθιστά μία περιβαλλοντικά φιλική πρώτη ύλη για τη παραγωγή βιοκαυσίμων.

Πίνακας 2. Απαιτήσεις σε άζωτο και αποδόσεις σε αιθανόλη διαφόρων φυτών [9]

	Απαιτήσεις σε N (kg/στρ)	Αποδόσεις σε αιθανόλη (lt/στρ)
Σιτάρι	12-20	172-331
Καλαμπόκι	13-22	227-404
Τεύτλα	14-15	524-791

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dalianis C., 1996. Adaptation, productivity and agronomic aspects of sweet sorghum under EU conditions. *Proc. Of First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry*, France, 15-25.
2. M. Mastroilli, N. Katerji, G. Rana, and P. Steduto 1995. Sweet sorghum in Mediterranean climate: radiation use and biomass water use efficiencies. *Industrial Crops and Products*, 3, 253-260.
3. Bryan W., Monroe G., Nichols R., and Gascho G. 1981. Evaluation of Sweet Sorghum for Fuel Alcohol. *Proc. Of Winter Meeting Of ASAE*, paper No. 81-3571.
4. Smith G. A., Babgy M. O., Lewellan R. T., Doney D. L., Moore P. H., Hills F. J., Campbell L. G., Hogaboam G. J., Coe G. E., and Freeman K. 1987. Evaluation of Sweet Sorghum for Fermentable Sugar Production Potential. *Crop Science* 27: 788-793.
5. Soldatos P., and Chatzidaki M. 1999. Economic Evaluation of Biofuel Production in Greece. The Case of Ethanol. *Proc. Of "AgEnergy '99"*, Vol. 2 973-980 pp.
6. Panoutsou C., Kavadakis G., Namatov I., Natioti H., Nikolaou A., Thiveou H., Tsiotas K., and Danalatos N. 2000. 3rd year report of FAIR CT 96 1913: Environmental Studies On Sweet and Fiber Sorghum, Sustainable Crops for Biomass and Energy.
7. Dercas N., Panoutsou C., and Dalianis C. 1996. Water and Nitrogen Effects on Sweet Sorghum Growth and Productivity. *Proc. Of 9th European Conference and Technology Exhibition "Biomass for Energy and Industry"*. Ed. Chartier et. al., Pergamon Press U.K. 54-60 pp.
8. Dercas N., Panoutsou C., Dalianis C., and Sooter C. 1995. Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) Response to four irrigation and two Nitrogen fertilization rates. *Proc. Of 8th E.C Conference "Biomass for Energy, Environment, Agriculture"* Vol. 1 Ed. Chartier et. al., Pergamon Press. U.K 629-639 pp.
9. OECD/IEA, 1994. Biofuels, pp. 19-27.

ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΤΑΘΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ: ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Κ.Γ.Αρβανίτης¹, Ν. Σιγριμής², Γ.Δ.Πασγιάνος²

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Τ.Θ. 275, 54006,
Θεσσαλονίκη (email: karvan@agro.auth.gr).

² Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυτικών Πόρων και
Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, Αθήνα 11855

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο έλεγχος βιολογικών αντιδραστήρων επεξεργασίας βιομάζας είναι μία ενεργή περιοχή έρευνας, εξαιτίας του γεγονότος ότι τέτοιοι αντιδραστήρες είναι εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθούν. Στην παρούσα εργασία, προτείνονται νέες μέθοδοι βαθμονόμησης PID ελεγκτών για ασταθείς βιολογικούς αντιδραστήρες. Οι προτεινόμενες μέθοδοι εξασφαλίζουν ομαλή απόκριση σε μεταβολές του σημείου λειτουργίας, ταχεία ρύθμιση και ευρωστία έναντι παραμετρικών αβεβαιοτήτων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης κατά-δεικνύουν την αποτελεσματικότητα των προτεινομένων μεθόδων.

NEW TECHNIQUES IN THE CONTROL OF UNSTABLE BIOLOGICAL REACTORS FOR BIOMASS PROCESSING: THEORY AND SIMULATION

K.G.Arvanitis¹, N. Sigrimis², G.D.Pasgianos²

¹ Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, P.O. Box 275,
54006, Thessaloniki, GREECE (email: karvan@agro.auth.gr).

² Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Engineering, Iera
Odos 75, 11855 Athens, GREECE.

ABSTRACT

Control of biological reactors for biomass processing has become an active area of research in recent years, due to the fact that they can be extremely difficult to control. In this paper, new methods for tuning PID controllers for such unstable reactors are reported. The proposed methods ensure smooth closed-loop response to set-point changes, fast regulatory control and robustness against parametric uncertainty. The simulation results prove the effectiveness of the proposed PID tuning methods.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βιολογικοί αντιδραστήρες επεξεργασίας βιομάζας λειτουργούν συχνά περίξ ασταθών μονίμων καταστάσεων (σημείων ισορροπίας). Για την προσέγγιση της δυναμικής τους με σκοπό τη σχεδίαση ελεγκτών, χρησιμοποιούνται ασταθή πρώτης τάξης μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς με νεκρό χρόνο [1], [2]. Ο έλεγχος τέτοιων συστημάτων είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος [3]-[6], λόγω του γεγονότος ότι οι κλασσικές μέθοδοι βαθμονόμησης PID ελεγκτών, όπως οι μέθοδοι Ziegler-Nichols και Cohen-Coon [7], δεν είναι εφαρμόσιμες σε τέτοια συστήματα, εξαιτίας της ιδιαιτερότητάς τους. Το κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων βαθμονόμησης, οι οποίες έχουν προταθεί για ασταθή πρώτης τάξης συστήματα με νεκρό χρόνο, είναι ότι αποδίδουν υπερβολικά μεγάλη υπερύψωση στην απόκριση κλειστού συστήματος. Το γεγονός αυτό έχει επισημανθεί στην εργασία [8], στην οποία επιπλέον προτείνεται ένας νέος κανόνας βαθμονόμησης, ο οποίος ενσωματώνει τη δομή ελέγχου P-PI δύο σταδίων και τον κανόνα βαθμονόμησης ελεγκτή εσωτερικού μοντέλου [4].

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση διάφορων νέων μεθόδων βαθμονόμησης PID ελεγκτών για ασταθείς διεργασίες πρώτης τάξης με νεκρό χρόνο. Σε αντίθεση με τους γνωστούς κανόνες βαθμονόμησης, οι οποίοι απολήγουν σε υπερύψωση της απόκρισης κλειστού συστήματος ή απαιτούν την τροποποίηση της δομής ανατροφοδότησης, οι προτεινόμενες μέθοδοι διασφαλίζουν ομαλή απόκριση και ευρωστία έναντι παραμετρικών αβεβαιοτήτων ενώ διατηρούν την κλασσική δομή των PID ελεγκτών. Αυτή η βελτιωμένη συμπεριφορά καθίσταται εφικτή με τη χρήση μίας σειράς φίλτρων εισόδου και με την εφαρμογή ορισμένων απλών κανόνων υπολογισμού των παραμέτρων του ελεγκτή. Ειδικότερα, στην εργασία διερευνώνται δύο εναλλακτικές δομές PI ελεγκτή με φίλτρα εισόδου: Μία βασισμένη σε ένα φίλτρο πρώτης τάξης και μία βασισμένη σε ένα φίλτρο τέταρτης τάξης. Αναλύεται επίσης μία δομή PID ελεγκτή με φίλτρο εισόδου δεύτερης τάξης. Οι προτεινόμενοι κανόνες βαθμονόμησης βασίζονται σε ορισμένες νέες, μεγάλης ακρίβειας προσεγγίσεις των συχνοτήτων τομής και είτε εκφράζονται με όρους μίας προσαρμοζόμενης παραμέτρου, η οποία δύναται να επιλεγεί για την εξασφάλιση κρίσιμης απόκρισης ή την ελαχιστοποίηση ενός κριτηρίου βασισμένου στο ολοκλήρωμα των τετραγωνικών σφαλμάτων και των κανονικοποιημένων τετραγωνικών αποκλίσεων του ελεγκτή [9], είτε βασίζονται στην ταυτόχρονη ικανοποίηση επιθυμητών περιθωρίων ενίσχυσης και φάσης [7]. Στην εργασία δίδονται σαφείς σχέσεις για την επιλογή των προσαρμοζόμενων παραμέτρων. Τέλος, παρουσιάζεται μία εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων στο ασταθές μοντέλο ενός βιολογικού αντιδραστήρα με σημαντική καθυστέρηση λόγω μέτρησης. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθόδων, οι οποίες αποδίδουν βελτιωμένη συμπεριφορά κλειστού συστήματος.

2. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ PID ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΜΕ ΦΙΛΤΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος πρώτης τάξης με νεκρό χρόνο είναι

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-ds}}{Ts - 1}$$

όπου K , d και T είναι το κέρδος, ο χρόνος καθυστέρησης και η σταθερά χρόνου, αντίστοιχα. Για τον έλεγχο συστημάτων αυτού του τύπου, προτείνεται στη συνέχεια η

δομή PI ελεγκτή με φίλτρα εισόδου του Σχήματος 1, όπου $G_C(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή, η οποία έχει τη μορφή

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right)$$

όπου K_C και τ_I είναι το κέρδος και η σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης του ελεγκτή, ενώ $G_{SPF}(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου εισόδου, η οποία είναι δυνατόν να λάβει μία από τις ακόλουθες εναλλακτικές μορφές

$$G_{SPF,1}(s) = 1/(\tau_I s + 1) \quad (1)$$

και

$$G_{SPF,2}(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (2)$$

$$b_1 = \left(1 - \frac{1}{KK_C} \right) \tau_I - 0.5d, \quad b_2 = \left(\frac{T-0.5d}{KK_C} - 0.5d \right) \tau_I, \quad b_3 = \frac{dT}{2KK_C} \tau_I$$

$$a_1 = \tau_I \left(2 - \frac{1}{KK_C} \right), \quad a_2 = \left(1 - \frac{1}{KK_C} \right) \tau_I^2 + \left(\frac{T-0.5d}{KK_C} \right) \tau_I - 0.25d^2$$

$$a_3 = \left(\frac{T-0.5d}{KK_C} \right) \tau_I^2 + \left(\frac{0.5dT}{KK_C} - 0.5d^2 \right) \tau_I, \quad a_4 = \left(\frac{0.5dT}{KK_C} - 0.25d^2 \right) \tau_I^2$$

με περιορισμούς $a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 > 0$, $a_2 a_3 - a_1 a_4 > 0$, $a_4 > 0$, $a_3 > 0$, $b_2 > 0$, $b_1 b_2 - b_3 > 0$, οι οποίοι τίθενται για να εξασφαλισθεί ότι το φίλτρο εισόδου είναι ευσταθές και χωρίς μηδενικά στο δεξιό μιγαδικό ημιπίεδο.

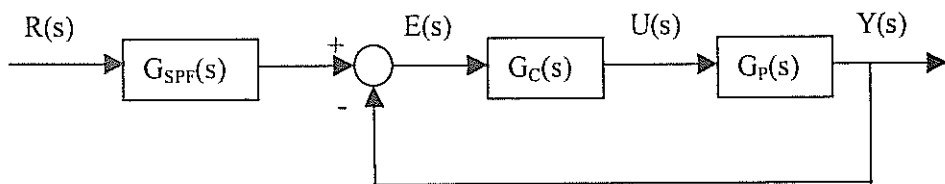
Στη συνέχεια, είναι επιθυμητή η βαθμονόμηση του PI ελεγκτή. Για το σκοπό αυτό, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το φίλτρο εισόδου (1), η συνάρτηση μεταφοράς βρόχου της δομής ελέγχου του Σχήματος 1 είναι [10]

$$G_{L,1}(s) = G_C(s)G_P(s) = \frac{KK_C(\tau_I s + 1)}{\tau_I s(Ts - 1)} \exp(-ds) \quad (3)$$

ενώ, στην περίπτωση του φίλτρου εισόδου (2), η συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού συστήματος προσεγγίζεται από τη σχέση [10]

$$G_{CL,2}(s) = \frac{\exp(-ds)}{\lambda^2 s^2 + 2\zeta\lambda s + 1} \quad \text{με } \lambda = \sqrt{\tau_I \left(\frac{T}{KK_C} - 0.5d \right)}, \quad \zeta = \frac{\tau_I - 0.5d - \frac{\tau_I}{KK_C}}{2\sqrt{\tau_I \left(\frac{T}{KK_C} - 0.5d \right)}} \quad (4)$$

ενώ, η συνάρτηση μεταφοράς βρόχου είναι [10]



Σχήμα 1. Η προτεινόμενη δομή ελέγχου βασισμένη σε φίλτρα εισόδου.

$$G_{L,2}(s) = \frac{KK_c(1+0.5ds)(\tau_1 s+1)}{\tau_1 s(Ts-1)} \exp(-ds) \quad (5)$$

Στη συνέχεια, προτείνεται μία μέθοδος βαθμονόμησης ΠΙ ελεγκτών με πρώτης τάξης φίλτρο εισόδου, βασισμένη στην ταυτόχρονη ικανοποίηση επιθυμητών περιθωρίων ενίσχυσης G_M και φάσης P_M [7]. Με κατάλληλους αλγεβρικούς χειρισμούς της σχέσης (3), οι προτεινόμενες παράμετροι του ΠΙ ελεγκτή που εξασφαλίζουν τα επιθυμητά περιθώρια ενίσχυσης και φάσης είναι (βλ. λεπτομέρειες στην εργασία [10])

$$\tau_1 = \frac{2\pi T}{3T \left(\frac{2P_M G_M + \pi G_M (G_M - 1)}{2d(G_M^2 - 1)} \right) \left(\pi - \frac{2P_M G_M + \pi G_M (G_M - 1)}{(G_M^2 - 1)} \right) - 2\pi} \quad (6)$$

$$K_c = \frac{T[2P_M + \pi(G_M - 1)]}{2Kd(G_M^2 - 1)} \quad (7)$$

Στην περίπτωση φίλτρου εισόδου τέταρτης τάξης, προτείνονται οι ακόλουθοι δύο αλγόριθμοι βαθμονόμησης:

Αλγόριθμος 1. Αρχικά υποθέτουμε μία μεγάλη τιμή του τ_1 , έστω $\tau_1 = 100T$. Εν συνεχεία, υπολογίζουμε τις ποσότητες

$$\hat{\omega}_{\min} = \sqrt{\frac{\pi}{3(T-0.5d)\tau_1}}, \quad \hat{\omega}_{\max} = \frac{\pi}{2d} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8d(T+\tau_1)}{3\pi T\tau_1}} \right] \quad (8)$$

$$\hat{K}_{c,\min} = \frac{1}{K} \frac{\sqrt{1+(T\hat{\omega}_{\min})^2}}{\sqrt{1+(\tau_1\hat{\omega}_{\min})^2}} \frac{\tau_1\hat{\omega}_{\min}}{\sqrt{1+(0.5d\hat{\omega}_{\min})^2}}, \quad \hat{K}_{c,\max} = \frac{1}{K} \frac{\sqrt{1+(T\hat{\omega}_{\max})^2}}{\sqrt{1+(\tau_1\hat{\omega}_{\max})^2}} \frac{\tau_1\hat{\omega}_{\max}}{\sqrt{1+(0.5d\hat{\omega}_{\max})^2}} \quad (9)$$

Τότε, εκλέγουμε

$$K_c = \sqrt{\hat{K}_{c,\min} \hat{K}_{c,\max}}, \quad \tau_1 = \hat{\tau}_{1,\max} / \gamma_1 \quad (10)$$

όπου $\hat{\tau}_{1,\max} = \left(\frac{3\pi}{8d} \left[1 - \left(\frac{2d\hat{\omega}_F}{\pi} - 1 \right)^2 \right] - \frac{1}{T} \right)^{-1}$ και $\hat{\omega}_F$ είναι η μέγιστη θετική πραγματική ρίζα της εξίσωσης

$$(g_1 T^2 - \frac{g_2 \tau_1^2 d^2}{4}) \hat{\omega}_F^4 + \left[g_1 - g_2 \left(\tau_1^2 + \frac{d^2}{4} \right) \right] \hat{\omega}_F^2 - g_2 = 0 \quad (11)$$

με

$$g_1 = \sqrt{1 + \frac{d^2}{4} (\hat{\omega}_{\min}^2 + \hat{\omega}_{\max}^2) + \frac{d^4}{16} (\hat{\omega}_{\min} \hat{\omega}_{\max})^2} \sqrt{1 + \tau_1^2 (\hat{\omega}_{\min}^2 + \hat{\omega}_{\max}^2) + \tau_1^4 (\hat{\omega}_{\min} \hat{\omega}_{\max})^2}$$

$$g_2 = \hat{\omega}_{\min} \hat{\omega}_{\max} \sqrt{1 + T^2 (\hat{\omega}_{\min}^2 + \hat{\omega}_{\max}^2) + T^4 (\hat{\omega}_{\min} \hat{\omega}_{\max})^2}$$

ενώ γ_1 είναι προσαρμοζόμενη παράμετρος.

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι την επίτευξη σύγκλισης.

Αλγόριθμος 2. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα του Αλγορίθμου 1 μέχρι και τον υπολογισμό του K_c , μέσω της πρώτης των εξισώσεων (10). Εν συνεχεία θέτουμε

$$\tau_1 = \hat{\tau}_{1,\min} / \gamma_2, \quad \hat{\tau}_{1,\min} = \pi \left(3(T-0.5d)\hat{\omega}_F^2 \right)^{-1}$$

όπου $\hat{\omega}_F$ είναι η μέγιστη θετική πραγματική ρίζα της εξίσωσης (11), ενώ γ_2 είναι προσαρμοζόμενη παράμετρος. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι την επίτευξη σύγκλισης.

Ο υπολογισμός των προσαρμοζόμενων παραμέτρων γ_i , $i=1,2$, γίνεται είτε με βάση τις σχέσεις

$$\frac{d^2}{4} \gamma_1^2 - \left[d \left(1 - \frac{1}{KK_c} \right) + 4 \left(\frac{T}{KK_c} - \frac{d}{2} \right) \right] \hat{\tau}_{1,\max} \gamma_1 + \left(1 - \frac{1}{KK_c} \right)^2 \hat{\tau}_{1,\max}^2 = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2}{4} \gamma_2^2 - \left[d \left(1 - \frac{1}{KK_c} \right) + 4 \left(\frac{T}{KK_c} - \frac{d}{2} \right) \right] \hat{\tau}_{1,\min} \gamma_2 + \left(1 - \frac{1}{KK_c} \right)^2 \hat{\tau}_{1,\min}^2 = 0$$

με σκοπό την επίτευξη κρίσιμης απόκρισης ($\zeta = 1$, στη σχέση (4)) [10] είτε με βάση την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου κόστους [9]

$$J_{\text{ISENSCOD}} = \int_0^{\infty} \left[y(t) - r(t) \right]^2 + K^2 \left[u(t) - u_x \right]^2 dt$$

μέσω προσομοίωσης. Εκτεταμένες προσομοιώσεις αποφέρουν τις τιμές των προσαρμοζόμενων παραμέτρων ως συναρτήσεις της ποσότητας d/T . Επί παραδείγματι για την παράμετρο γ_2 , λαμβάνουμε [10]

$$\gamma_2 = \frac{-0.00296 + 0.84111 \left(\frac{d}{T} \right) - 2.77972 \left(\frac{d}{T} \right)^2 + 2.47645 \left(\frac{d}{T} \right)^3}{1 + 0.10985 \left(\frac{d}{T} \right) - 9.47509 \left(\frac{d}{T} \right)^2 + 12.44899 \left(\frac{d}{T} \right)^3}$$

Στην περίπτωση, ενός PID ελεγκτή με συνάρτηση μεταφοράς

$$G_C(s) = K_c (1 + 1/(\tau_I s) + \tau_D s) \quad \text{ή} \quad G_C(s) = \tilde{K}_c (1 + 1/(\tau_A s)) (1 + \tau_B s)$$

όπου

$$K_c = \tilde{K}_c \left(\frac{\tau_A + \tau_B}{\tau_A} \right), \quad \tau_I = \tau_A + \tau_B, \quad \tau_D = \frac{\tau_A \tau_B}{\tau_A + \tau_B} \quad (13)$$

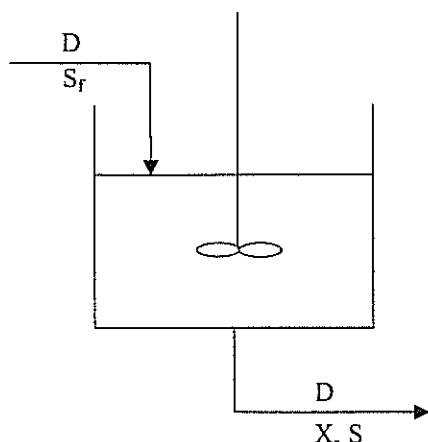
το φίλτρο εισόδου λαμβάνει τη μορφή

$$G_{\text{SPF},3}(s) = \frac{1}{(\tau_A s + 1)(\tau_B s + 1)}$$

Τότε $\tau_B = 0.5d$, ενώ οι παράμετροι \tilde{K}_c και τ_A υπολογίζονται με βάση τους Αλγορίθμους 1 ή 2. Με βάση τις ποσότητες \tilde{K}_c , τ_A και τ_B , οι παράμετροι του PID ελεγκτή υπολογίζονται πλέον μέσω των σχέσεων (13).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΣΤΑΘΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Μία σχηματική αναπαράσταση ενός βιολογικού αντιδραστήρα επεξεργασίας βιομάζας δίνεται στο Σχήμα 2. Υποθέτουμε ότι ο αντιδραστήρας είναι σταθερού όγκου, ότι τα συστατικά της αντίδρασης είναι καλά αναμεμειγμένα και ότι η τροφοδοσία είναι αποστειρωμένη. Ο ρυθμός διάλυσης D είναι διαθέσιμος ως υπό χειρισμό είσοδος, ενώ S_f είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος τροφοδοσίας (feed substrate



Σχήμα 2. Σχηματικό διάγραμμα βιολογικού αντιδραστήρα επεξεργασία βιομάζας

concentration). Επιπλέον, X είναι η συγκέντρωση της εκρέουσας βιομάζας και S είναι η συγκέντρωση υποστρώματος. Στην παραγωγή αιθανόλης, για παράδειγμα, τα X και S αναπαριστούν τις συγκεντρώσεις μαγιάς και γλυκόζης, αντίστοιχα.

Μία πληθώρα μοντέλων έχουν προταθεί για τέτοιου είδους διεργασίες. Δομημένα μοντέλα επιχειρούν να περιγράψουν λεπτομερειακά τους ανεξάρτητους οργανισμούς, οι οποίοι εμπλέκονται στις πραγματοποιούμενες χημικές αντιδράσεις, αλλά συνήθως είναι ιδιαίτερα πεπλεγμένα από μαθηματικής άποψης για να είναι χρήσιμα για τη σχεδίαση ελεγκτών. Αρκετά απλούστερα, μη δομημένα μοντέλα είναι δυνατόν να ληφθούν υποθέτοντας ότι η καλλιέργεια του αντιδραστήρα αποτελείται από ένα ομογενώς αναπτυσσόμενο είδος οργανισμού. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται συνήθως από λίγες μη γραμμικές κανονικές διαφορικές εξισώσεις και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την εφαρμογή μη γραμμικών στρατηγικών ελέγχου. Η συμπεριφορά ανοικτού βρόχου ενός βιολογικού αντιδραστήρα, σταθερού όγκου και αποστειρωμένης τροφοδοσίας είναι δυνατόν να περιγραφεί από το ακόλουθο μη δομημένο μοντέλο [11]

$$\frac{dX}{dt} = (\mu(S) - D)X \quad , \quad \frac{dS}{dt} = D(S_f - S) - \frac{\mu(S)X}{Y_{X/S}} \quad , \quad \mu(S) = \frac{\mu_m S}{K_m + S + \frac{S^2}{K_i}} \quad (14)$$

όπου, $\mu(S)$ είναι ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης, $Y_{X/S}$ είναι ο συντελεστής απόδοσης βιομάζας, μ_m είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης, K_m είναι η σταθερά ρυθμού ανάπτυξης και K_i είναι η σταθερά αναστολής του υποστρώματος. Ορισμένες τυπικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου είναι $Y_{X/S} = 0.4\%g/g$, $S_f = 4\%g/g$, $D = 0.36h^{-1}$, $\mu_m = 0.53h^{-1}$, $K_m = 0.12\%g/g$, $K_i = 0.4545\%g/g$ [11].

Η λύση μόνιμης κατάστασης των εξισώσεων (14) εμφανίζει πολλαπλές μόνιμες καταστάσεις. Μία τετριμμένη κατάσταση (συνθήκη αχρηστίας) στο $[X, S]_1 = [0, 4]$, μία ασταθής μόνιμη κατάσταση στο $[X, S]_2 = [0.9951, 1.5122]$, όπως επίσης και μία ευσταθής μόνιμη κατάσταση στο $[X, S]_3 = [1.5301, 0.1746]$ είναι δυνατόν να προβλεφθούν για το προαναφερθέν μοντέλο.

Στην παρούσα μελέτη είναι επιθυμητό, η λειτουργία και ο έλεγχος του αντιδραστήρα να λαμβάνει χώρα στην ασταθή μόνιμη κατάσταση $[X, S]_2$. Η συγκέντρωση βιομάζας X είναι η υπό έλεγχο μεταβλητή. Οι περιορισμοί της υπό χειρισμό

μεταβλητής είναι $D_I=0.25 \text{ h}^{-1}$ και $D^U=0.40 \text{ h}^{-1}$. Στη μέτρηση του X λαμβάνεται υπόψη μία χρονική καθυστέρηση της τάξης της μίας ώρας. Η συμπεριφορά του ανοικτού συστήματος στο ασταθές σημείο εναρμονίζεται με τοπική γραμμικοποίηση με αυτή ενός συστήματος πρώτης τάξης με νεκρό χρόνο της μορφής

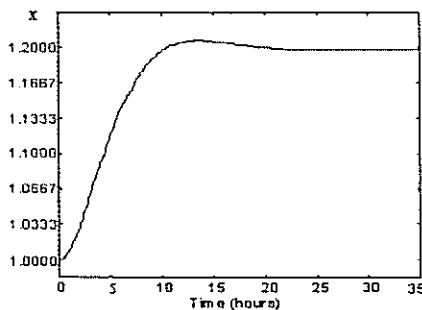
$$G_p(s) = \frac{-5.89}{5.86s-1} \exp(-s) \quad (15)$$

Στο προαναφερθέν μοντέλο βιολογικού αντιδραστήρα, εφαρμόζουμε αρχικά τον Αλγόριθμο 2, με την προσαρμοζόμενη παράμετρο γ_2 επιλεγμένη, σε τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το J_{ISENSCOD} . Αφού $d/T=0.1706$, λαμβάνουμε $\gamma_{2,\text{opt}} = 0.0894$. Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου αποφέρει $K_C = -0.5436$, $\tau_I = 6.9600$. Η απόκριση κλειστού συστήματος του αντιδραστήρα, για μία βηματική μεταβολή του επιθυμητού σημείου λειτουργίας από 0.9951 σε 1.1941, δίδεται στο Σχήμα 3.

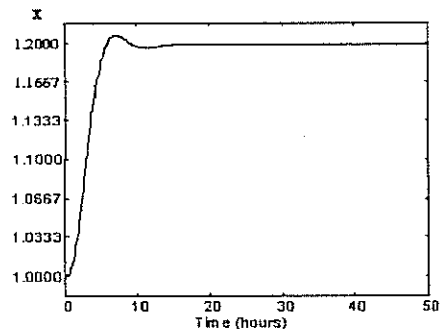
Εν συνεχεία, εφαρμόζουμε τη μέθοδο, η οποία βασίζεται στην ταυτόχρονη ικανοποίηση επιθυμητών περιθωρίων ενίσχυσης και φάσης, με στόχο τη σχεδίαση ενός PI ελεγκτή, ο οποίος εξασφαλίζει στο σύστημα κλειστού βρόχου, περιθώριο ενίσχυσης 2 dB και περιθώριο φάσης 20° . Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου αποφέρει τις παραμέτρους του PI ελεγκτή, $K_C = -0.6367$ και $\tau_I = 5.4095$. Η απόκριση κλειστού βρόχου του αντιδραστήρα, η οποία λαμβάνεται σε αυτή την περίπτωση, για μία βηματική μεταβολή του επιθυμητού σημείου λειτουργίας, από 0.9951 σε 1.1941, δίδεται στο Σχήμα 4.

Τέλος, εφαρμόζουμε στο μοντέλο του αντιδραστήρα, την προτεινόμενη μέθοδο σχεδίασης PID ελεγκτών. Για την ακρίβεια, εφαρμόζουμε τον Αλγόριθμο 1 (με την παράμετρο γ_1 να δίδεται από την εξίσωση (12)), ώστε να αποτιμήσουμε τις παραμέτρους \tilde{K}_C και τ_A . Τότε λαμβάνουμε $\tilde{K}_C = -0.5404$ και $\tau_A = 12.8190$. Ακολούθως, παρατηρούμε ότι $\tau_B = 0.5$. Τέλος, αποτιμώντας τις εξισώσεις (13) λαμβάνουμε $K_C = -0.5615$, $\tau_I = 13.3190$ και $\tau_D = 0.4812$. Η απόκριση κλειστού συστήματος σε αυτή την περίπτωση, για μία βηματική μεταβολή του επιθυμητού σημείου λειτουργίας, από 0.9951 σε 1.1941, δίδεται στο Σχήμα 5.

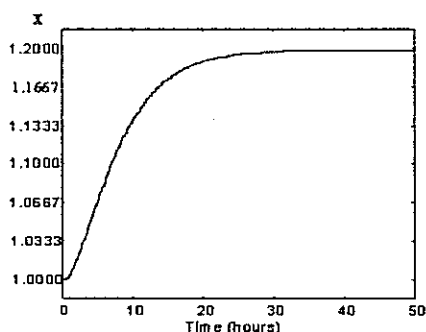
Λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκολία του προβλήματος, οι λαμβανόμενες αποκρίσεις, σε όλες τις περιπτώσεις οι οποίες διερευνήθηκαν είναι πολύ ικανοποιητικές.



Σχήμα 3. Απόκριση κλειστού βρόχου υπό PI έλεγχο με βάση τον Αλγόριθμο 2.



Σχήμα 4. Απόκριση κλειστού βρόχου υπό PI έλεγχο με βάση περιθώρια ευστάθειας.



Σχήμα 5. Απόκριση κλειστού βρόχου υπό PID έλεγχο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάστηκαν διάφορες νέες μέθοδοι βασισμένες σε φίλτρα εισόδου και σε ορισμένες ακριβείς προσεγγίσεις των συχνοτήτων τομής, για τη βαθμονόμηση PID ελεγκτών για ασταθή συστήματα. Οι προτεινόμενες μέθοδοι απαιτούν μικρό υπολογιστικό φόρτο και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για εν γραμμή εφαρμογές. Επιπλέον διασφαλίζουν ομαλή απόκριση, ταχεία ρύθμιση και σημαντική ευρωστία. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τα ληφθέντα από την εφαρμογή τους σε ένα μοντέλο βιολογικού αντιδραστήρα, καταδεικνύουν ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στον έλεγχο τέτοιων ασταθών διεργασιών επεξεργασίας βιομάζας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Rotstein, G.E. and Lewin, D.R., 1991. Simple PI and PID tuning for open-loop unstable systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 1864-1869.
2. Kavdia, M. and Chidambaram, M., 1996. On-line controller tuning for unstable systems. *Comp. & Chem. Eng.*, 20, 301-305.
3. De Paor, A.M. and O'Malley, M., 1989. Controllers of Ziegler-Nichols type for unstable process with time delay. *Int. J. Control*, 49, 1273-1284.
4. Morari, M. and Zafiriou, E., 1989. *Robust Process Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
5. Calvet, J.P. and Arkun, Y., 1990. Design of P and PI stabilizing controllers for quasi-linear systems. *Comp. & Chem. Eng.*, 14, 415-426.
6. Venkatasankar, V. and Chidambaram, M., 1994. Design of P and PI controllers for unstable first-order plus time delay systems, *Int. J. Control*, 60, 137-144.
7. Astrom, K.J. and Hagglund, T., 1995. *PID Controllers*, 2nd ed., ISA, Research Triangle Park, N.C.
8. Jacob, E.F. and Chidambaram, M., 1996. Design of controllers for unstable first-order plus time delay systems. *Comp. & Chem. Eng.*, 20, 579-584.
9. Wilton, S.R., 1999. Controller tuning, *ISA Trans.*, 38, 157-170.
10. Arvanitis, K.G., Sigrimis, N., Pasgianos, G.D. and Kalogeropoulos, G., 2000. New PI controller tuning formulas for unstable first order plus dead time processes. *8th IEEE Mediter. Conf Control & Autom.*, Patras, July 17-19, 2000, to appear.
11. Agarwal P. and Lim, H.C., 1986. Analysis of various control schemes for continuous bioreactors, *Adv. Biochem Biotechnology*, 30, 61-90.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΟΥΡΤΙΝΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

**Κ. Κίττας, Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Π. Γιαγλάρας,
Μ. Καραμάνης, Χρ. Λύκας**

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επίδραση της θερμοκουρτίνας, στην ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου μελετήθηκε πειραματικά σε γυάλινο θερμοκήπιο. Η χρήση θερμοκουρτίνας στο θερμοκήπιο περιόρισε σημαντικά τις απώλειες ενέργειας. Η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα ήταν 3-5 °C μεγαλύτερη σε σχέση με την θερμοκρασία του μάρτυρα, ενώ η σχετική υγρασία ήταν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος χαμηλότερη. Με τη χρήση της θερμοκουρτίνας, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 25 %, ενώ βρέθηκε ότι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της θερμοκουρτίνας συνδέεται με την εξωτερική θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με αρνητική συσχέτιση.

THE INFLUENCE OF A THERMAL SCREEN ON GREENHOUSE ENERGY BEHAVIOR

**C. Kittas, N. Katsoulas, Th. Bartzanas, P. Giaglaras,
M. Karamanis, Ch. Lykas**

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

ABSTRACT

The influence of a thermal screen on the energy behavior of a greenhouse was examined experimentally. The use of a thermal screen reduced significantly energy losses. The air in the greenhouse with the screen was always by 3-5 °C hotter and had lower relative humidity values compared to the air in a greenhouse without screen. The energy saving by the use of screen was about 25 %. The coefficient of air tightness efficiency of the screen is related to the temperature and speed of the outside air.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην προσπάθεια για μείωση των εισροών ενέργειας για θέρμανση των θερμοκηπίων, η οποία θα οδηγήσει σε άμεση μείωση του κόστους παραγωγής και σε «καθαρότερο» περιβάλλον, λόγω μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων, υιοθετήθηκαν απλές τεχνικές (ψεκασμός νερού στην οροφή του θερμοκηπίου, μόνωση βορινής πλευράς, χρήση θερμοκουρτίνας, χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων), με κύριο σκοπό την αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Η χρήση θερμοκουρτίνας μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου, τροποποιώντας τα ισοζύγια ακτινοβολίας, αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας του θερμοκηπίου και να οδηγήσει είτε σε μείωση του κόστους θέρμανσης στα θερμαινόμενα θερμοκήπια είτε σε επιμήκυνση της καλλιεργητικής περιόδου στα μη θερμαινόμενα. Έτσι είναι εφικτή η παραγωγή πρωιμότερων και ποιοτικά καλύτερων προϊόντων αλλά ταυτόχρονα είναι δυνατή η υποκατάσταση παραδοσιακών καλλιεργειών με θερμικά απαιτητικότερες. Η θερμοκουρτίνα παρεμβαίνει στις ανταλλαγές ενέργειας με ακτινοβολία καθώς απορροφά, επανακπέμπει και ανακλά προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου μέρος της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που προέρχεται από το εσωτερικό του θερμοκηπίου. Επίσης περιορίζει τον όγκο του αέρα που πρέπει να θερμανθεί και δημιουργώντας μια νέα επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας με ακτινοβολία, αγωγή και συναγωγή, μειώνει τον ολικό συντελεστή θερμοπερατότητας του θερμοκηπίου. Κατά συνέπεια μειώνει δραστικά την κατανάλωση ενέργειας και τους εκπεμπόμενους ρύπους.

Κατά την δεκαετία του 70 έγιναν πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη τεχνολογιών για εξοικονόμηση ενέργειας. Στον τομέα των θερμοκηπίων οι πρώτες προσπάθειες για την εφαρμογή των θερμοκουρτίνων έγιναν στην Ιαπωνία [1] ενώ στο Institute of Agricultural Engineering της Αγγλίας, η ομάδα του Bailey, μελέτησε διεξοδικά την εφαρμογή διαφόρων τύπων θερμοκουρτίνων με επένδυση από λεπτά φύλλα (λουρίδες) αλουμινίου [2] και υπολόγισε την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί.

Ο Von Zabelitz (1988) παρουσίασε ερευνητική εργασία σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή διαφόρων τύπων θερμοκουρτινών, όπως φύλλα πολυαιθυλενίου, πολυεστερικά φύλλα, ακρυλικά υλικά, αλλά και σύνθετα υλικά με ταινίες από αλουμίνιο κ.λ.π. Ο ίδιος ερευνητής όρισε έναν αδιάστατο συντελεστή (f) για την αξιολόγηση της αεροστεγανότητας της θερμοκουρτίνας [3]. Η αεροστεγανότητα μεταξύ του θερμαινόμενου και μη τμήματος του θερμοκηπίου, τα οποία χωρίζονται με τη θερμοκουρτίνα, παίζει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αν η θερμοκουρτίνα δεν απομονώνει καλά τους δύο χώρους, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Παράλληλα, έγιναν προσπάθειες για την μελέτη της εφαρμογής των θερμοκουρτινών με την βοήθεια μαθηματικών προσομοιωμάτων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου [4, 5, 6, 7, 8]. Επίσης έγιναν αρκετές προσπάθειες για την ανάπτυξη προσομοιωμάτων για τον προσδιορισμό των ανταλλαγών θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ των διαφόρων εγκλείστων που δημιουργούνται με την τοποθέτηση θερμοκουρτίνας σε θερμοκήπιο [9, 10]. Διάφορα μοντέλα αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό της νυχτερινής καθαρής θερμικής ακτινοβολίας με στόχο να χρησιμοποιηθούν οι θερμοκουρτίνες και για αντιπαγετική προστασία, [11, 12].

Όλες οι προσπάθειες που αναφέρθησαν παραπάνω έγιναν σε συστηματικά θερμαινόμενα γυάλινα θερμοκήπια σε περιοχές με κρύο χειμώνα. Δεν υπάρχουν

δεδομένα για τη χρήση θερμοκουρτινών σε συστηματικά θερμαινόμενα θερμοκήπια σε κλίματα με ήπιους χειμώνες, ενώ παντελής είναι η έλλειψη γνώσης για τις δυνατότητες εφαρμογής θερμοκουρτινών σε ψυχροκήπια (θερμοκήπια χωρίς θέρμανση).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου με τη χρήση της θερμοκουρτίνας στην περιοχή του Βόλου, περιοχή με ήπιους χειμώνες.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς της θερμοκουρτίνας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου έγινε συστηματική καταγραφή των παραγόντων του μικροκλίματος, για μια καλλιεργητική περίοδο στα γυάλινα πειραματικά θερμοκήπια του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο θερμοκήπια με κατεύθυνση Β-Ν, έκτασης 200 m² το καθένα το χειμώνα του 1998. Στο ένα υπήρχε θερμοκουρτίνα, διπλά επιμεταλλωμένη, καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας ενώ το άλλο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Στα θερμοκήπια υπήρχε καλλιέργεια γαρδένιας.

Τα θερμοκήπια θερμαίνονταν με σύστημα κυκλοφορίας ζεστού νερού σε μεταλλικούς σωλήνες τοποθετημένους στα πλάγια και στην οροφή του θερμοκηπίου, πάνω από την καλλιέργεια. Η θερμοκρασία του θερμοστάτη ήταν 18 °C.

Οι κλιματικοί παράγοντες που καταγράφονταν ήταν:

- Θερμοκρασία, υγρασία πάνω και κάτω από την θερμοκουρτίνα και στο μάρτυρα, η θερμοκρασία του κελύφους του θερμοκηπίου και η θερμοκρασία των σωλήνων θέρμανσης και στα δύο θερμοκήπια.
- Ολική και καθαρή ακτινοβολία πάνω και κάτω από την θερμοκουρτίνα, και στο μάρτυρα.
- Θερμοκρασία, υγρασία, ακτινοβολία και ταχύτητα του ανέμου του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Οι μετρήσεις όλων των παραμέτρων γίνονταν κάθε 1 λεπτό και καταγραφόταν ο μέσος όρος κάθε 10 λεπτά σε σύστημα συλλογής δεδομένων (Data Logger, DL 3000).

Για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου υπολογίστηκαν οι παρακάτω συντελεστές:

Α) Ο αδιάστατος συντελεστής αεροστεγανότητας, fa της θερμοκουρτίνας ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$fa = \frac{T_a - T_{out}}{T_{in} - T_{out}} \quad (1)$$

όπου: T_a , T_{in} και T_{out} είναι η θερμοκρασία του αέρα, στο χώρο πάνω και κάτω από την θερμοκουρτίνα και έξω από το θερμοκήπιο αντίστοιχα.

Ο παραπάνω συντελεστής μας δείχνει την μείωση της θερμοκρασίας πάνω από την θερμοκουρτίνα σε σχέση με την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα. Όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές του παραπάνω συντελεστή τόσο αποτελεσματικότερη είναι η θερμοκουρτίνα. Η τιμή του παραπάνω συντελεστή εξαρτάται και από τον τύπο της θερμοκουρτίνας και η τιμή του κυμαίνεται από 0.27 – 0.70 (Zabeltitz, 1988). Υψηλότερες τιμές μπορεί να παρατηρηθούν σε περιπτώσεις μη καλής στεγανότητας του

θερμοκηπίου, λόγω κενών μεταξύ του χώρου που απομονώνει η θερμοκουρτίνα και λόγω υψηλών ταχυτήτων του εξωτερικού αέρα.

B) Το ενεργειακό κέρδος από τη χρήση της θερμοκουρτίνας δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{U_{ns} - U_s}{U_{ns}} \quad (2)$$

όπου: U ($W m^{-2} K^{-1}$) είναι ο ολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας. Οι δείκτες «ns» και «s» υποδηλώνουν τη χρήση ή μη της θερμοκουρτίνας στο θερμοκήπιο.

Αν Q ($W m^{-2}$) είναι οι ανάγκες θέρμανσης και ΔT (K) είναι η διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, ο συντελεστής U δίνεται από τη σχέση:

$$U = \frac{Q}{\Delta T} \quad (3)$$

Οι ανάγκες θέρμανσης, Q , ισούνται με την αποδιδόμενη ενέργεια από το σύστημα θέρμανσης και δίνονται από τη σχέση:

$$Q = h * \Delta T_p \quad (4)$$

όπου h ($W m^{-2} K^{-1}$) είναι ένας ολικός συντελεστής μεταφοράς ενέργειας από τους σωλήνες στον αέρα και ΔT_p η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σωλήνων και του αέρα του θερμοκηπίου.

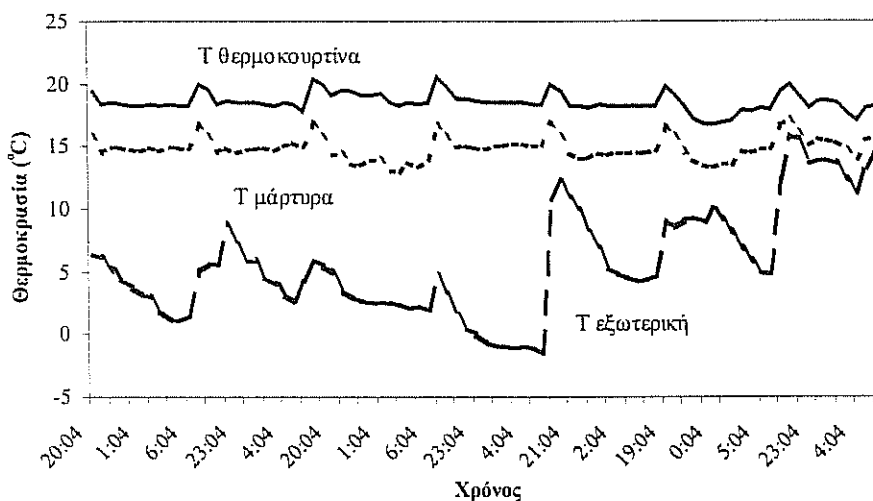
Από τις σχέσεις (2), (3) και (4) υπολογίζεται ο συντελεστής K σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K = \frac{\Delta T_s * \Delta T_{p, ns} - \Delta T_{ns} * \Delta T_{p, s}}{\Delta T_{p, ns} * \Delta T_s} \quad (5)$$

Ο συντελεστής K παίρνει τιμές από 0 έως 1 και όταν οι τιμή του είναι 1 το κέρδος από τη χρήση της θερμοκουρτίνας είναι 100%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

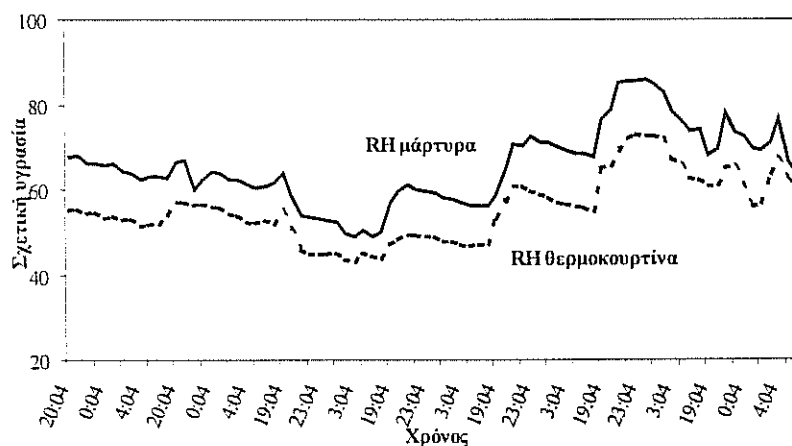
Η μεταβολή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα και στο μάρτυρα σε σχέση με την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος παρουσιάζεται στο Σχ. 1. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα είναι υψηλότερη από το μάρτυρα, κάτι που άλλωστε αναμενόταν. Η διαφορά σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει τους 5 °C.



Σχήμα 1. Μεταβολή των θερμοκρασιών στα δύο θερμοκήπια (θερμοκουρτίνα και μάρτυρα) σε σχέση με την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα ήταν μικρότερα σε σχέση με αυτά του μάρτυρα, (Σχήμα 2) κάτι που ερμηνεύεται λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα.

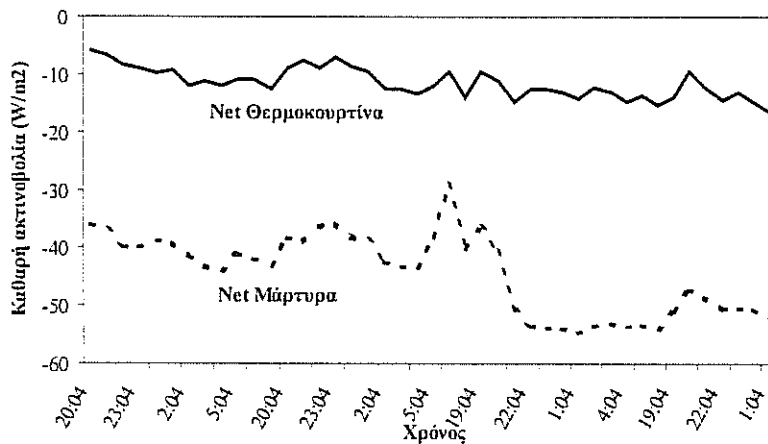
Είναι γνωστό, ότι υψηλά επίπεδα υγρασίας επηρεάζουν την ποιότητα και ποσότητα των παραγομένων προϊόντων καθώς οδηγούν σε φυσιολογικές ανωμαλίες και αυξημένες παρασιτικές και μυκητολογικές ασθένειες.



Σχήμα 2. Διαφορά σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα σε σχέση με το μάρτυρα.

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (net radiation) ενώ είχε θετικές τιμές κατά την διάρκεια της ημέρας γινόταν αρνητική την νύχτα. Οι αρνητικές τιμές αναμένονταν αφού κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του εδάφους είναι υψηλότερη από

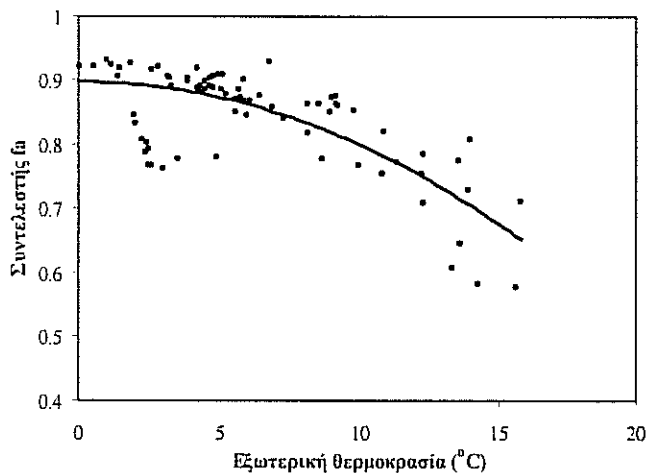
αυτή του ουρανού με αποτέλεσμα να υπάρχει μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας από τη γη στον ουρανό.



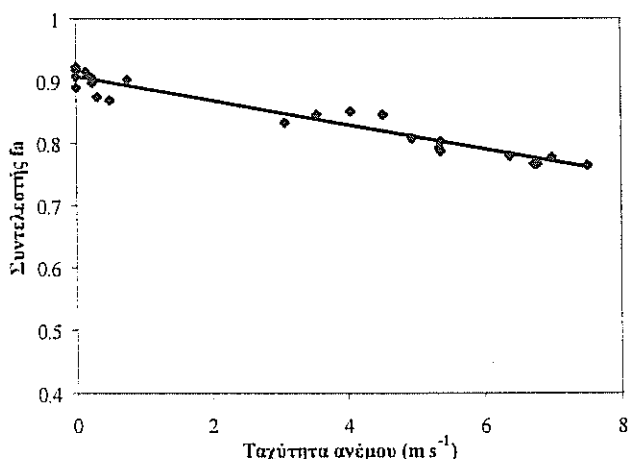
Σχήμα 3. Διαφορά της καθαρής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της νύχτας για τα δύο θερμοκήπια..

Όμως οι απόλυτες τιμές των νυχτερινών τιμών της καθαρής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα ήταν χαμηλότερες από αυτές του μάρτυρα. Κατά συνέπεια οι απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία περιορίζονται σημαντικά όταν υπάρχει εγκατεστημένη θερμοκουρτίνα στο θερμοκήπιο. Σύμφωνα με τον Teitel (1996) οι απώλειες της θερμικής ακτινοβολίας εξαρτώνται και από τον τύπο της θερμοκουρτίνας και οι τιμές τους μεταβάλλονται έως και 20%. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι διαφορές στην καθαρή ακτινοβολία για το θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα και για το μάρτυρα (οι τιμές είναι αρνητικές γιατί αναφερόμαστε σε νυχτερινές τιμές).

Ο υπολογισμός του συντελεστή f_a από τη σχέση (1) έδωσε τα δύο παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 4 και 5) όπου παρουσιάζεται η σχέση του παραπάνω συντελεστή με την εξωτερική θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Σχέση του αδιάστατου συντελεστή f_a και της εξωτερική θερμοκρασίας



Σχήμα 5. Σχέση του αδιάστατου συντελεστή f_a με την ταχύτητα του ανέμου.

Από τα σχήματα 4 και 5 φαίνεται ότι ο συντελεστής μειώνεται όσο αυξάνουν η εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου και η ταχύτητα του ανέμου.

Η μέση τιμή του αδιάστατου συντελεστή f_a , η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (1), ήταν 0.8, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από αυτές που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία. Η υψηλή τιμή του f_a δείχνει ότι το σύστημα της χρησιμοποιηθείσας θερμοκουρτίνας δεν είναι αποτελεσματικό όσον αφορά τη μείωση των απωλειών θερμότητας με συναγωγή από την οροφή του θερμοκηπίου. Η κακή αεροστεγανότητα της κουρτίνας ενδεχόμενα να οφείλεται στα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των τμημάτων της κουρτίνας λόγω κακής ρύθμισης του μηχανισμού ανοίγματος της κουρτίνας.

Τέλος, όσον αφορά το συντελεστή εξοικονόμησης ενέργειας, K , η μέση τιμή του, η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5), βρέθηκε ίση με 0.25. Αυτό σημαίνει πως με τη χρήση της θερμοκουρτίνας επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας ίση με 25 %.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρουσία της θερμοκουρτίνας στο θερμοκήπιο τροποποιεί τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι:

- Η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο με θερμοκουρτίνα ήταν 3-5 °C μεγαλύτερη σε σχέση με την θερμοκρασία του μάρτυρα.
- Τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας του θερμοκηπίου με θερμοκουρτίνα ήταν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος χαμηλότερα από αυτά του μάρτυρα.
- Η χρήση θερμοκουρτίνας στο θερμοκήπιο περιορίζει σημαντικά τις απώλειες με θερμική ακτινοβολία από το έδαφος του θερμοκηπίου προς το εξωτερικό περιβάλλον.
- Ο αδιάστατος συντελεστής f συνδέεται με την εξωτερική θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με αρνητική συσχέτιση.
- Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας που επιτεύχθηκε με τη χρήση της θερμοκουρτίνας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν της τάξης του 25 %.

Ενδιαφέροντα σημεία συνέχισης της έρευνας για την διερεύνηση των επιδράσεων της θερμοκουρτίνας στην ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου θα ήταν:

- Η περαιτέρω μελέτη, εργαστηριακά των ακτινομετρικών ιδιοτήτων των συνηθέστερων τύπων θερμοκουρτινών του εμπορίου για αξιολόγηση της μείωσης των απωλειών ενέργειας με ακτινοβολία.
- Η μελέτη της δυνατότητας αντιπαγετικής προστασίας με χρήση θερμοκουρτίνας με την μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς της θερμοκουρτίνας σε μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο (ψυχροκήπιο).
- Η περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της θερμοκουρτίνας στον ολικό συντελεστή απωλειών του θερμοκηπίου.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Okada, M., Hayashim, K., 1978. Reducing Heat Consumption by Curtain Insulating Systems, 76: 103-110.
2. Bailey, B.G., 1978. Heat Conservation in Glasshouses with Aluminised Thermal Screens. *Acta Horticulturae*, 76: 275-278.
3. Von Zabeltitz, C., 1988. Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating. FAO - CNRE REUR Technical Series 3: 67-69.
4. Chandra, P., Albright, L.D., 1980. Analytical determination of the effect on greenhouse heating requirements of using night curtains. *Transactions of the ASAE*: 994-1000.
5. Seginer, I., Albright, L.D., 1980. Rational operation of greenhouse thermal-curtains. *Transactions of the ASAE*: 1240-1245.
6. Baille, A., Aries, F., Baille, M., Laury, J.C., 1985. Influence of thermal screen optical properties on heat losses and microclimate of greenhouses. *Acta Horticulturae* 174: 111-118.
7. Steinbuch, F., 1985. A strategy to control greenhouse thermal screens based on theoretical plant responses. *Acta Horticulturae* 174: 327-329.
8. Rosa, R., 1988. Solar and Thermal Radiation inside a Multispan Glasshouse with Thermal Screen. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 40: 285-290.
9. Silva, A. M., Rosa, R., 1987. Radiative heat loss inside a greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 37: 155-162.
10. Papadakis, G., Frangoudakis, A., Kyritsis, S., 1989. Theoretical and Experimental Investigation of thermal Radiation transfer in Polyethylene Covered Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 44: 97-111.
11. Teitel, M., Peiper, U. M., Zvieli, Y., 1996. Shading Screens for Frost Protection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81: 273-286.
12. Teitel, M., Segal, I., 1995. Net Thermal Radiation Under Shading Screens. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 19-26.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ ΜΕ 4 ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΔΑΦΟΥΣ

**Χ. Καβαλάρης, Θ.Α. Γέμτος, Ι. Παπαθανασίου, Χ. Καραμούτης,
Χ. Γούλας**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογικών Επιστημών. Τμήμα Φυτικής κ' Ζωικής Παραγωγής. Πεδίο Αρεως, Βόλος, Τ.Κ. 38334.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προκειμένου να εκτιμηθεί η μείωση του κόστους παραγωγής των ζαχαροτεύτλων, μελετήθηκαν 4 μέθοδοι μειωμένων εισροών για την κατεργασία του εδάφους σε σύγκριση με τη συμβατική κατεργασία (Σ). Οι μέθοδοι ήταν: Κατεργασία, 1) με βαρύ καλλιεργητή (BK), 2) με περιστροφικό καλλιεργητή (ΠΚ), 3) με δισκοσβάρνα (Δ) και 4) ακαλλιέργεια (Α). Για κάθε μέθοδο εκτιμήθηκαν οι ενεργειακές εισροές κατά την κατεργασία του εδάφους, τη χημική ζιζανιοκτονία και τα σκαλίσματα. Η ενεργειακή παραγωγικότητα (kg βάρους ριζών / MJ εισροών) ήταν για την (Σ) 10,8, για τη (BK) 13,2 για την (ΠΚ) 9,4, για τη (Δ) 10,9 και για την (Α) 6,4.

SUGAR BEET CROP ENERGY INPUTS WITH FOUR REDUCED SOIL TILLAGE METHODS

**C. Cavalaris, T.A. Gemtos, J. Papathanasiou, C. Karamoutis,
and C. Goulas**

University of Thessaly. School of technological science. Faculty of Agriculture. Pedio Aeeos, Volos 38334.

ABSTRACT

In order to reduce production costs in the sugar beet crop, an experiment was established in which four soil tillage methods were compared with a conventional one (CO) using moldboard plough. The reduced tillage methods were with: 1) heavy cultivator (HC), 2) rotary cultivator (RC), 3) disk harrow (DH) and 4) no-tillage (NT). For each method the energy inputs from tillage, chemical and mechanical weed control was measured. Energy productivity as the ratio of sugar beet yield to input energy (kg/MJ), were for the (CO) 10,8, for the (HC) 12,8, for (RC) 9,4 for (DH) 11,2 and for (NT) 6,4.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τα πρώτα στάδια εκμηχάνισης της γεωργίας, η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της απαραίτητης ισχύος δεν αποτελούσε σημαντική οικονομική επιβάρυνση στο συνολικό κόστος της παραγωγής. Συνέπεια του γεγονότος αυτού ήταν ο γεωργικός τομέας να αναπτυχθεί στηριζόμενος στην εξέλιξη ιδιαίτερα ενεργοβόρων τεχνολογιών όπως οι μεγάλοι γεωργικοί ελκυστήρες. Ωστόσο, από τη δεκαετία του 70 και έπειτα, οι πρώτες ενεργειακές κρίσεις πετρελαίου, προκάλεσαν μια γενικότερη ανησυχία για το μέλλον και τη βιωσιμότητα των τομέων παραγωγής που βασίζονταν στη χρήση ορυκτής ενέργειας, μεταξύ δε αυτών και η γεωργία. Προέκυψε λοιπόν μια γενική αναθεώρηση των απόψεων σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει η ενέργεια να αξιοποιείται στην παραγωγή και έννοιες όπως η μείωση των εισροών και η ορθολογική χρήση των συντελεστών της παραγωγής εισήλθαν για πρώτη φορά στο προσκήνιο.

Από τη συνολική ενέργεια που εισρέει στην ευρύτερη γεωργική παραγωγή, το 33,7% προστίθεται με τα λιπάσματα, το 18,4% με την κατεργασία, το 9,7% με τις αρδεύσεις και το 38,2% με τις υπόλοιπες καλλιεργητικές επεμβάσεις[2]. Η υιοθέτηση συστημάτων διατήρησης (*conservation tillage*) υπόσχεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ως σύστημα διατήρησης ορίζεται οποιοδήποτε σύστημα κατεργασίας και σποράς κατά την εφαρμογή του οποίου διατηρείται τουλάχιστον το 30% της εδαφικής επιφάνειας καλυμμένο με φυτικά υπολείμματα. Στα συστήματα αυτά περιλαμβάνονται τεχνικές όπως η μειωμένη κατεργασία, η κατεργασία σε λωρίδες ή αναχώματα και η ακαλλιέργεια. Σε εδάφη φτωχής δομής, τα μηχανήματα κατεργασίας που ισχυοδοτούνται από το δυναμοδότη είναι τα πιο αποτελεσματικά για την προετοιμασία της σποροκλίνης με ένα ελάχιστο αριθμό επεμβάσεων. Σε εδάφη καλής δομής ωστόσο, μη ισχυοδοτούμενα από το δυναμοδότη μηχανήματα κατεργασίας όπως δισκοσβάρνες και ελαφρείς καλλιεργητές, μπορούν να είναι το ίδιο αποτελεσματικά [7]. Με τον περιορισμό της κατεργασίας του εδάφους δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά η απόδοση των ζαχαροτεύτλων. Η απόδοση (βάρος ριζών) όταν δεν εφαρμόζεται όργωμα μπορεί να είναι ισοδύναμη με αυτή σε οργωμένο έδαφος, με την προϋπόθεση αυξημένης αζωτού-χου λίπανσης [6]. Προκαταρκτικά δεδομένα από την μελέτη διαφόρων μεθόδων μειω-μένων εισροών για τις Ελληνικές συνθήκες έδειξαν ότι το φύτερωμα και η εξέλιξη της καλλιέργειας μέχρι την συγκομιδή, ακολουθεί την εντατικότητα της κατεργασίας [5].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ποσοτική εκτίμηση των εισροών κατά την εφαρμογή μειωμένης κατεργασίας. Για την απόκτηση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας, συνεκτιμήθηκαν οι ενεργειακές εισροές για άλλους δυο τομείς στους οποίους υπήρξε διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων, τη χημική ζιζανιοκτονία και τα σκαλίσματα.

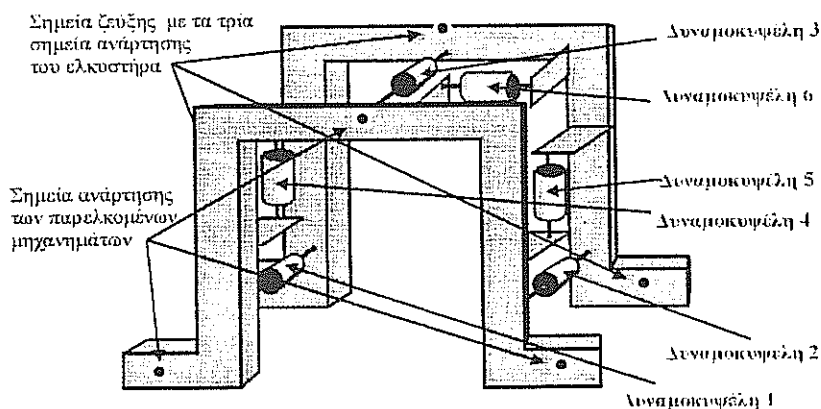
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι πέντε μέθοδοι κατεργασίας του εδάφους που μελετήθηκαν ήταν:

1. Συμβατική κατεργασία (Σ): Όργωμα στα 25-30cm και 2 περάσματα με δισκοσβάρνα.
2. Μειωμένη κατεργασία (BK): Πέρασμα με βαρύ καλλιεργητή σε βάθος 20-25 cm και ένα πέρασμα με δισκοσβάρνα.
3. Μειωμένη κατεργασία (ΠΚ): Πέρασμα με περιστροφικό καλλιεργητή στα 10-12 cm.
4. Μειωμένη κατεργασία (Δ): Δύο περάσματα με δισκοσβάρνα σε βάθος 6-8 cm.
5. Ακαλλιέργεια (Α): Απ' ευθείας σπορά σε ακατέργαστο έδαφος και καταστροφή της υπάρχουσας βλάστησης με *glyphosate* πριν το φύτερωμα της καλλιέργειας.

Το πειραματικό σχέδιο ήταν διαιρεμένες ομάδες (split block) με 5 κύρια τεμάχια (6x10m) όπου τοποθετήθηκαν οι μέθοδοι κατεργασίας και 2 υπο-τεμάχια (3x10m) στα οποία σάρφηκαν δυο από τις καλλιεργούμενες ποικιλίες τεύτλων, η *RIHZOR* και η *TURBO*. Το πείραμα περιελάμβανε 4 επαναλήψεις και διενεργήθηκε σε δυο πειραματικούς αγρούς, ο 1ος με έδαφος ιλλο-αργιλώδες και ο 2ος με αργιλώδες.

Οι πρωτογενείς κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν στις 26/3/98 με μέση εδαφική υγρασία 18% ενώ η προετοιμασία της σποροκλίνης ολοκληρώθηκε μια εβδομάδα αργότερα. Στα τεμάχια της ακαλλιέργειας έγινε στις 8/4 ψεκάσμος με 800 g/στρ. glyphosate. Η σπορά έγινε στις 6/4 τοποθετώντας 30.000 σπ/στρ σε βάθος 2-3 cm ενώ ο πληθυσμός ρυθμίστηκε στα 10.000 φ/στρ. με αραιώμα που έγινε στις 15/5. Πριν τη σπορά, έγινε ενσωμάτωση 14-10-8 μονάδων N-P-K. Για τα πλατύφυλλα έγιναν 3 ψεκάσμοι με το μείγμα: (*BETANAL PROGRESS* 50 g/στρ., *GOLTIX* 50 g/στρ. και *SUNOIL* 50 g/στρ) στις 27/4, 4/5 και 1/6. Για τα αργωστώδη ψεκάστηκαν στις 28/4 και 6/5 80g/στρ. *GALLAND'S*. Επιπλέον έγιναν δυο σκαλίσματα με το χέρι. Το πρώτο στις 15/5 και το δεύτερο στις 12/6. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 ποτίσματα με δόση άρδευσης 80 m³/στρ. Η συγκομιδή των τεύτλων έγινε με το χέρι στις 19/10/98 και μετρήθηκε η απόδοση σε νωπό βάρος ριζών.



Σχήμα 1. Η διάταξη δυναμομέτρησης

Η ενέργεια που καταναλώνεται για την μηχανική κατεργασία του εδάφους ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται για την έλξη του μηχανήματος κατεργασίας και της ενέργειας που μεταδίδεται μέσω του δυναμοδότη. Για την εκτίμηση αυτών των ποσοτήτων, κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του εδάφους μεταξύ του γεωργικού ελκυστήρα και των μηχανημάτων κατεργασίας, παρεμβλήθηκε ένα σύστημα δυναμομέτρησης του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Παν. Θεσσαλίας [9]. Το σύστημα περιελάμβανε δυο Π, αρθρωτά συνδεδεμένα με έξι δυναμοκυψέλες, με τις οποίες ήταν δυνατή η μέτρηση των ασκούμενων στο χώρο δυνάμεων (Σχήμα 1). Τρεις δυναμοκυψέλες, δυο κάτω (1, 2) και μια επάνω (3), παράλληλες με την διεύθυνση κίνησης του ελκυστήρα μετρούσαν δυνάμεις έλξης. Η συνισταμένη τους αντιπροσώπευε την ελκτική δύναμη του ελκυστήρα. Επιπλέον, μεταξύ του δυναμοδότη και του τηλεσκοπικού άξονα μετάδοσης της κίνησης παρεμβλήθηκε ένα όργανο μέτρησης της ροπής και της γωνιακής ταχύτητας κατά την μετάδοση κίνησης σε παρελκόμενα μηχανήματα. Τα δεδομένα των μετρήσεων καταγράφονταν στη μνήμη ενός φορητού Η/Υ.

Για κάθε μηχανήμα κατεργασίας, με βάση την μέση ελκτική δύναμη και την μέση ταχύτητα εργασίας υπολογίζεται η ελκτική ισχύς. Η ισχύς στο δυναμοδότη, για όσα μηχανήματα παίρνουν κίνηση από αυτόν, υπολογίζεται ως το γινόμενο της μέσης ροπής με την γωνιακή ταχύτητα. Η θεωρητική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη συνολική ισχύ (έλξης και δυναμοδότη) με το χρόνο που απαιτείται με κάθε μηχανήμα για την κατεργασία μιας ορισμένης έκτασης. Κατά την μετάδοση όμως της κίνησης από τον κινητήρα του ελκυστήρα στα παρελκόμενα μηχανήματα συμβαίνει απώλεια ισχύος η οποία οφείλεται στην αντίσταση κύλισης και στην ολίσθηση των τροχών του ελκυστήρα καθώς και σε τριβές μεταξύ των κινούμενων μηχανικών τμημάτων. Ο συντελεστής μετάδοσης της ισχύος στο δυναμοδότη κυμαίνεται μεταξύ 0,87 - 0,90 [4]. Ο συντελεστής μετάδοσης στην έλξη, για συμπαγές έδαφος είναι 62,5% του συντελεστή μετάδοσης στο ΡΤΟ, δηλαδή 0,54, ενώ για καλλιεργημένο έδαφος, 55% του συντελεστή ΡΤΟ, δηλαδή 0,48 [10]. Για την ισχύ που αξιοποιείται στην έλξη, επιλέχθηκε, με βάση την κατάσταση του εδάφους, (καλλιεργημένο ή μη), ο ανάλογος συντελεστής μετάδοσης, ενώ για την ισχύ που αξιοποιείται στο δυναμοδότη, επιλέχθηκε ο συντελεστής 0,87. Ένα άλλο στάδιο κατά το οποίο υπάρχει σημαντική απώλεια ενέργειας είναι κατά την μετατροπή της ενέργειας του καυσίμου σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Ο συντελεστής απόδοσης (ΣA_K) για έναν ντίζελ κινητήρα είναι περίπου 0,25 [2]. Ωστόσο για να παραχθεί το εν λόγω καύσιμο και να μεταφερθεί στον τόπο κατανάλωσής του απαιτείται και πάλι η κατανάλωση ενέργειας. Ο συντελεστής απόδοσης για την άντληση, την επεξεργασία και τη διανομή του πετρελαίου είναι $\Sigma A_{\Pi} = 0,85$ [2]. Λαμβάνοντας υπόψη τους τρεις πιο πάνω συντελεστές ο συνολικός συντελεστής απόδοσης της ενέργειας σε ένα παρελκόμενο μηχανήμα είναι: $\Sigma A_{O\Lambda} = \Sigma A_M \times \Sigma A_K \times \Sigma A_{\Pi}$. Η ενέργεια του καταναλισκόμενου καυσίμου λοιπόν ισούται με το γινόμενο της ενέργειας που εκτιμάται με τις δυναμομετρήσεις και του συντελεστή $\Sigma A_{O\Lambda}$. Επιπλέον, για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα του ελκυστήρα απαιτείται και μια ποσότητα λιπαντικού η ενέργεια του οποίου εκτιμάται στο 4% της ενέργειας του καταναλισκόμενου καυσίμου [2]. Τέλος, ένας άλλος παράγοντας ο οποίος συνεισφέρει ενέργεια για την λειτουργία των γεωργικών μηχανημάτων είναι ο ίδιος ο άνθρωπος ως χειριστής. Η ενεργειακή αξία της ανθρώπινης εργασίας υπολογίζεται εκτιμώντας την μεταβολική ενέργεια για την παραγωγή μυϊκού έργου και προσθέτοντας σε αυτή, την ενέργεια που καταναλώνει ο άνθρωπος όταν δεν εργάζεται και την ενέργεια που απαιτείται για να εξασφαλίσει ένα μέσο επίπεδο διαβίωσης. Η τιμή που υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό είναι για έναν εργάτη 13 MJ/h [3]. Επιπλέον, κατά τη χρήση γεωργικών μηχανημάτων υπάρχει και μια έμμεση κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την απόσβεση της ενέργειας των σταθερών στοιχείων των μηχανημάτων, δηλαδή της ενέργειας που καταναλώθηκε για την κατασκευή τους, την μεταφορά και διανομή τους στον παραγωγό και της ενέργειας που προστίθεται σε αυτά για τις επισκευές. Έχει βρεθεί ότι για την κατασκευή των γεωργικών μηχανημάτων απαιτούνται 86,77 MJ/kg προϊόντος ενώ για τη διανομή τους χρειάζονται άλλα 8,8 MJ/kg [2]. Ακόμη, για κάθε μηχανήμα προτείνεται ένας συντελεστής (a) (Πίνακας 3), ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την αρχική ενέργεια κατασκευής δίνει το ενεργειακό ισοδύναμο των επισκευών και συντήρησης για όλη την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του μηχανήματος [1].

Τέλος, για την εκτίμηση της ενεργειακής αξίας των σκευασμάτων ζιζανιοκτονίας λαμβάνεται υπόψη ότι η μέση ενέργεια παραγωγής, μορφοποίησης, συσκευασίας και μεταφοράς που για τα υδατοδιαλυτά έλαια είναι 418,3 MJ/kg δ.ο. για τις βρέξιμες σκόνες 262,8 MJ/kg δ.ο. και για τα προσκολλητικά έλαια 179,6 MJ/kg σκευάσματος [8].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Κατανάλωση ενέργειας για τη κατεργασία του εδάφους.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και αποτελέσματα από τις δυναμομετρήσεις. Την μεγαλύτερη ισχύ στην έλξη απαιτεί ο βαρύς καλλιεργητής και τη μικρότερη η δισκοσβάρνα. Αν όμως συνεκτιμήσουμε και την ισχύ στον δυναμοδότη, τότε αποδεικνύεται ότι η χρήση του περιστροφικού καλλιεργητή επιβάλλει την χρήση μεγάλης ισχύος γεωργικό ελκυστήρα.

Πίνακας 1. Στοιχεία μηχανημάτων κατεργασίας του εδάφους και δυναμομέτρησης.

	ταχύ- τητα (km/h)	πλάτος εργασίας (m)	Θεωρ. από- δοση (στρ/h)	Αντίσ- ταση έλξη (kN)	Ροπή στο PTO (kN m)	Ισχύς στην έλξη (kW)	Ισχύς στο PTO (kW)
Άροτρο	2,88	1,2	3,46	27,42		21,94	
Βαρ. Καλλιεργητής	4,32	2	8,64	28,91		34,7	
Περ. Καλλιεργητής	3,52	2,5	8,81	5,13	0,77	4,93	43,32
Δισκοσβάρνα (1η)	9	3	27	6,61		16,53	
Δισκοσβάρνα (2η)	9,54	3	28,62	5,85		15,52	
Δισκ. μετά από άροτρο (1η)	7,42	3	22,25	7,12		14,67	
Δισκ. μετά από άροτρο (2η)	8,5	3	25,49	6,11		14,42	
Δισκ. μετά από ΒΚ (1η)	7,96	3	23,87	6,06		13,4	
Ψεκαστικό	10,8	12	129,6	0	0,07		3,96

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η θεωρητική ενέργεια που μέσω των μετρήσεων στην έλξη και στο PTO εκτιμάται ότι απαιτείται για την λειτουργία των μηχανημάτων. Στην συνέχεια, με βάση τους συντελεστές (ΣΑ_Μ), (ΣΑ_Κ), και (ΣΑ_Π), υπολογίζεται η ενέργεια του καταναλισκόμενου καυσίμου και η οποία είναι περίπου 10πλάσια της θεωρητικής ενέργειας. Στον ίδιο πίνακα, υπολογίζεται η ενέργεια των λιπαντικών και με βάση τη θεωρητική απόδοση κάθε μηχανήματος, το έργο που αντιστοιχεί στον χειριστή.

Πίνακας 2. Άμεσες εισροές ενέργειας κατά την χρήση γεωργικών μηχανημάτων.

	Ενέργεια (MJ/στρ)	έλξης	PTO	καυσίμου	λιπαν- τικών	ανθρώπ. εργασίας	Σύνολο
Άροτρο	22.85			199.1	7.97	3.71	210.8
Βαρ. Καλλιεργητής	14.45			126.0	5.04	1.51	132.6
Περ. Καλλιεργητής	2.05	18.03		115.4	4.62	1.44	121.5
Δισκοσβάρνα (1η)	2.2			19.2	0.77	0.48	20.4
Δισκοσβάρνα (2η)	1.9			19.1	0.76	0.45	20.3
Δισκ. μετά από άροτρο (1)	2.37			23.2	0.93	0.58	24.7
Δισκ. μετά από άροτρο (2)	2.04			20.0	0.80	0.51	21.3
Δισκ. μετά από ΒΚ (1η)	2.02			19.8	0.79	0.54	21.1
Ψεκαστικό			0.66	0.6	0.02	0.10	0.7

Στον Πίνακα 3, με βάση την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής κάθε μηχανήματος [4], υπολογίζεται η απόσβεση της ενέργειας των σταθερών στοιχείων ανά ώρα λειτουργίας. Στην τελευταία στήλη, προσθέτοντας την απόσβεση της ενέργειας ανά ώρα λειτουργίας κάθε μηχανήματος με αυτή του ελκυστήρα και διαιρώντας το άθροισμα με την αντίστοιχη θεωρητική απόδοση, υπολογίζεται η ενέργεια, όλων των σταθερών στοιχείων, που εισρέει με κάθε καλλιεργητική επέμβαση.

Πίνακας 3. Ενέργεια σταθερών στοιχείων των γεωργικών μηχανημάτων.

	Βάρος (kg)	Ενέργεια		a*	Ενέργεια επισ- κευών (MJ)	Διάρ- κεια ζωής (h)	Αποσβ. ενέργειας	
		κατασ- κευής (MJ)	μετα- φοράς (MJ)				μηχανή- ματος (MJ/h)	μηχάν + ελκυστήρ (MJ/στρ)
Ελκυστήρας	5000	433.850	44.000	0,49	212.587	12.000	57,54	
Αροτρο	300	26.031	2.640	0,97	25.250	2.000	26,96	24,42
Βαρ. Καλλιεργητής	250	21.693	2.200	0,51	11.063	2.000	17,48	8,68
Περ. Καλλιεργητής	150	13.016	1.320	0,59	7.679	1.500	14,68	8,2
Δισκοσβάρνα	200	17.354	1.760	0,61	10.586	2.000	14,85	2,85
Ψεκαστικό	80	6.942	704	0,37	2.568	1.500	6,81	0,5

*a = συντελεστής εκτίμησης ενέργειας επισκευών και συντήρησης [1]

3.2. Ενέργεια ψεκασμών

Στον Πίνακα 4, με βάση τον τύπο του κάθε σκευάσματος, την περιεκτικότητα σε δ.ο., την δόση εφαρμογής και το πλήθος των ψεκασμών, εκτιμάται η ενέργεια που εισρέει με την εφαρμογή του. Επιπλέον, από τις δυναμομετρήσεις (Πίνακες 1 και 2) εκτιμάται ότι η ενέργεια για την λειτουργία του ψεκαστικού, συμπεριλαμβανοντας την ενέργεια της ανθρώπινης εργασίας, είναι 0,7 MJ/στρ. Η απόσβεση της ενέργειας των σταθερών στοιχείων (Πίνακας 3) του ψεκαστικού και του ελκυστήρα είναι 0,5 MJ/στρ. Συνολικά, για τη λειτουργία του ψεκαστικού απαιτούνται $0,7 + 0,5 = 1,2$ MJ/στρ.

Πίνακας 4. Ενέργεια σκευασμάτων ζιζανιοκτονίας

Εμπορική ονομασία	Δραστική ουσία	Ενέργεια	Περιεκτ δ.ο. (%)	Δόση εφαρ- μογής kg/στρ	Αριθμ. ψεκασ- μών	Ενέργεια MJ/στρ
		σκευάσ- ματος (MJ/kg δ.ο.)				
BETANAL PROGRESS	Desmedipham	418,24	6	0,05	3	11,4
	Phenmedipham	418,24	6			
	Ethofusanate	418,24	6			
GOLTIX	WP Metamitron	262,84	70	0,05	3	27,6
SUNOIL	O Parafinic Oil	179,6	100	0,05	3	27
GALLAND'S S	MO Haloxyfop	418,24	10,8	0,08	2	7,3
ROUNDAP	WP Glyphosate	478,2	42	0,8	1	160,7

* MO = υδατοδιαλυτό έλαιο, WP = βρέξιμη σκόνη, O = προσκολλητικό έλαιο

3.3 Ενέργεια σκαλισμάτων.

Για τον έλεγχο των ζιζανίων χρειάστηκαν δύο σκαλίσματα που πραγματοποιήθηκαν με το χέρι. Ο διαφορετικός πληθυσμός ωστόσο των ζιζανίων στα πειραματικά τεμάχια, ανάλογα με την εντατικότητα της μεθόδου κατεργασίας, είχε σαν συνέπεια την διαφοροποίηση της στρεμματικής απόδοσης των εργατών. Η μέση απόδοση ενός εργάτη για την μέθοδο της (ΣΚ) ήταν 0,11 στρ/η, για το (ΒΚ) 0,10 στρ/η, για τις (ΠΚ) και (Δ) 0,08 στρ/η, ενώ για την (Α) όπου τα ζιζάνια αποτελούσαν έντονο πρόβλημα, μόλις 0,05 στρ/η. Αποτέλεσμα της διαφοροποίησης αυτής ήταν η διαφορετική εισροή ανθρώπινης ενέργειας σε κάθε μέθοδο. Λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό ισοδύναμο των 13 MJ/h/εργάτη [3], η ενέργεια που εισέρει μέσω της ανθρώπινης εργασίας κατά τα σκαλίσματα είναι για την (ΣΚ) 244,7 MJ/στρ., για την (ΒΚ) 260 MJ/στρ., για τις (ΠΚ) και (Δ) 346,7 MJ/στρ. και τέλος για την (Α) 520 MJ/στρ.

3.4. Ενεργειακή παραγωγικότητα

Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται οι εισροές ενέργειας κατά την κατεργασία του εδάφους, τους ψεκασμούς και τα σκαλίσματα. Στον ίδιο πίνακα συμπεριλαμβάνεται η απόδοση των τεύτλων. Με βάση τα στοιχεία αυτά υπολογίζεται η ενεργειακή παραγωγικότητα των εισροών ως ο λόγος: (μονάδα παραγόμενου προϊόντος) / (μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας). Παρότι η απόδοση στην μέθοδο (ΒΚ) είναι, σε σχέση με τη (Σ), ελαφρώς πιο χαμηλή, εν τούτοις, η παραγωγικότητα της καταναλισκόμενης ενέργειας αποδεικνύεται πολύ αποτελεσματικότερη εξαιτίας της σημαντικής μείωσης των εισροών κατά την κατεργασία του εδάφους. Το ίδιο συμβαίνει με τη (Δ) όπου η ενεργειακή παραγωγικότητα αποδεικνύεται ίδια με της (Σ).

Πίνακας 5. Ενεργειακές εισροές και απόδοση τεύτλων.

		Συστήματα κατεργασίας:	Σ	ΒΚ	ΠΚ	Δ	Α	
Εισροές ενέργειας (MJ/στρ)	1	Καλλιεργητικές επεμβάσεις	Όργωμα	234,9				
			Βαρ. Καλλιεργητής		131,1			
			Περ. Καλλιεργητής			129,5		
			Δισκοσβάρνα (1η)	28,0	24,2		23,1	
			Δισκοσβάρνα (2η)	24,2			22,9	
			ΣΥΝΟΛΟ	287,1	155,3	129,5	46	0
	2	Ψεκασμοί	Betanal, Goltix, Sunoil, Galland;s	81,4	81,4	81,4	81,4	81,4
			Glyphosate					164,86
	3	Σκαλίσματα		244,7	260,0	346,7	346,7	520,0
			ΣΥΝΟΛΟ (1), (2), (3)	613,2	496,7	557,5	474,0	766,2
	Απόδοση τεύτλων (ρίζες, kg/στρ)			6.619	6.542	5.225	5.158	4.889
	Ενεργειακή παραγωγικότητα (kg/MJ)			10,8	13,2	9,4	10,9	6,4

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η πιο ενεργοβόρος μέθοδος για την κατεργασία του εδάφους αποδεικνύεται η συμβατική. Με τη μέθοδο του (BK) υπάρχει μια σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 46%, με τη μέθοδο του (ΠΚ) εξοικονόμηση 55%, με τη (Δ) εξοικονόμηση 84% ενώ με την (Α) φυσικά, εξοικονόμηση 100%.
- Για τη χημική ζιζανιοκτονία, η (Α) παρουσιάζει κατά 202% αυξημένη εισροή ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, εξαιτίας της εφαρμογής του glyphosate.
- Εξετάζοντας το σύνολο των ενεργειακών εισροών και για τους τρεις τομείς, διαπιστώνεται ότι η μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση υφίσταται στη μέθοδο της (Δ), ενώ η μέθοδος της (Α) εμφανίζει απροσδόκητα υψηλή κατανάλωση ενέργειας κυρίως εξαιτίας των πιο εντατικών σκαλισμάτων.
- Εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής αξίας της ανθρώπινης εργασίας η εξοικονόμηση ενέργειας από την κατεργασία μπορεί πολύ εύκολα να αντισταθμιστεί με ενέργεια που εισρέει κατά τα σκαλίσματα, όταν η χημική ζιζανιοκτονία δεν είναι αποτελεσματική.
- Η εφαρμογή μεθόδων μειωμένης κατεργασίας επιφέρει μια σαφή μείωση της απόδοσης. Η μείωση αυτή ακολουθεί την εντατικότητα της κατεργασίας.
- Υπολογίζοντας την παραγωγικότητα των ενεργειακών εισροών διαπιστώνουμε ότι η μεγαλύτερη παραγωγικότητα παρουσιάζουν με φθίνουσα σειρά οι μέθοδοι: (BK) → (Δ) = (Σ) → (ΠΚ) → (Α).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fluck, R.C. (1985). Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. *Trans. ASAE*, 28: 738-744.
2. Fluck R.C. (1992). Energy in world agriculture. Vol 6, Energy in farm production. *Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands*.
3. Freedman, S.M., (1982). Human labor as an energy source for rice production in the developing world. *Agro-Ecosystems*, 8: 125-136.
4. Hunt, D., (1995). Cost Determination. In: *Farm Power and Machinery Management*. Iowa State University Press
5. Kavalaris, C., and Gemtos, T.A. (1998) Soil tillage and rotation effect in sugar beet crop. *Proc. of the International Conference on Agricultural Engineering. Oslo 98*.
6. Koch, H.J. and Marlander, B. (1994). Wetchen Beitrag Kann die Bodenbearbeitung zum integrierten Anbau von Zuckerruben leisten? *Proc. 57th Winter Congr. Int. Inst. S. Beet Res.* pp.1-22.
7. Larney, F.J., Fortune, R.A. and Collins, J.F. (1988). Intrinsic soil physical parameters influencing intensity of cultivation procedures for sugar beet seedbed preparation. *Soil and Tillage Research*. 12. pp.253-67.
8. Pimentel, D., (1980). Energy inputs for the production, formulation, packaging and transport of various pesticides. In: *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL, 45 pp.
9. Γέμτος, Α.Θ. και Τσιρίκογλου, Ι.Θ. (1994). Ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση ενός συστήματος μέτρησης και καταγραφής των εξασκούμενων δυνάμεων από γεωργικό ελκυστήρα σε αναρτημένα γεωργικά μηχανήματα. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα* 4, (89-96).
10. Τσατασαρέλης, Α. Κ. (1995). Διαχείριση Γεωργικών Μηχανημάτων. *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης. Υπηρεσία δημοσιευμάτων* (σ. 134).

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Δ. Ντόντορος, Γρ. Λαμπρινός
Γ.Π.Α - Τμήμα ΑΦΠ & ΓΜ, Ιερά Οδός 75 - 11855 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής αύξηση της τιμής της ενέργειας μας υποχρεώνει να σχεδιάσουμε προσεκτικά μια ψυκτική μονάδα. Η σωστή επιλογή της μεθόδου και ο καλός σχεδιασμός του ψυκτικού κύκλου μπορεί να οδηγήσει σε 30% και 18% εξοικονόμηση ενέργειας αντίστοιχα. Η καλή εκλογή της μόνωσης και η προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση έως 10% της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ο αναλυτικός και ακριβής υπολογισμός των φορτίων μπορεί να μας γλιτώσει από υπερβάλλουσα εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως ακόμη και του 100%. Για την επιλογή του ψυκτικού ρευστού πρέπει σήμερα να ληφθούν υπ' όψη και οικολογικά κριτήρια, ενώ μια αλλαγή του αυθεντικού ψ. ρευστού με υποκατάστατο νέας γενιάς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ψυκτικής ικανότητας μέχρι και 25%. Φυσικά κατά τον σχεδιασμό δεν πρέπει να αμεληθούν τα συστήματα ελέγχου και αποπάγωσης.

PLANING A REFRIGERATING UNIT AND ENERGY SAVING

D. Dodoros, G. Lambrinos
Agronomic University of Athens, Dept. of Agricultural Engineering,
75 Iera Odos street – 11855 Greece

ABSTRACT

The ever increasing cost of energy has led to the need to plan carefully the refrigerating unit. A good design of the refrigerating cycle, can save up to 18%, while the choice of the processing leads up to 30% of energy saving. A proper choice of insulating material, vapour barriers and paints can lead to an energy saving of 10%. An analytical and precise calculation of the cold store plant loads will keep us away from even 100% power excess. The choice of the refrigerant must be not only on the basis of

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Σε λίγες χώρες διατίθενται αναλυτικά σχετικά στοιχεία, κυρίως στις Σκανδιναβικές. Από κάποιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς [5], το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από τα ψυκτικά συγκροτήματα μπορεί να κυμαίνεται, ανάλογα με την χώρα, από 2,5% έως 20%. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι μόνο το 20-30% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για ψύξη αντιπροσωπεύει τα ψυκτικά συγκροτήματα βιομηχανικού και εμπορικού τύπου. Αξιοσημείωτο είναι ακόμη το γεγονός ότι η εγκαταστημένη ψυκτική ισχύς σε θαλάμους μεγαλύτερους από 2000 m³ κυμαίνεται μεταξύ 10 και 35 W/m³. Οι πληροφορίες αυτές δείχνουν πόσο επιτακτική γίνεται η ανάγκη εξεύρεσης οικονομικών ενεργειακών λύσεων, που θα χαρακτηρίζονται όμως και από ευαισθησία όσον αφορά τα οικολογικά ζητήματα.

Σε μια ψυκτική εγκατάσταση είναι πολλά τα σημεία στα οποία έχουμε ενεργειακές απώλειες άξιες λόγου, αλλά και οι τρόποι που βοηθούν στην εξοικονόμηση ενέργειας υπάρχουν και πρέπει να τους αναζητήσουμε. Τα μέτρα που μπορούμε να λάβουμε για την ενεργειακά αποδοτικότερη λειτουργία ενός ψυκτικού συγκροτήματος αναφέρονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- α) Το σχεδιασμό και τη μελέτη της ψυκτικής μονάδας
- β) Τη κατασκευή της μονάδας
- γ) Τη χρήση και τη συντήρησή της

Όταν αναφερόμαστε στην κατασκευή εννοούμε τόσο τη σωστή κατασκευή των μονάσεων όσο και την ορθή επιλογή του εξοπλισμού της εγκατάστασης. Η κατηγορία αυτή μπορεί να βοηθήσει μέχρι 25 % την εξοικονόμηση ενέργειας [3], [4].

Η εκμετάλλευση και η συντήρηση της μονάδας μπορούν να οδηγήσουν σε λιγότερο ή περισσότερο αποδοτικά ενεργειακά αποτελέσματα. Η εκμετάλλευση αφορά στη ρύθμιση και στο προγραμματισμό λειτουργίας, ενώ η συντήρηση αφορά στη πρόληψη τυχόν προβλημάτων, στην επέμβαση για την επίλωσή τους καθώς και στον τακτικό έλεγχο λειτουργίας. Μια ορθολογική εκμετάλλευση και μια καλή συντήρηση μπορούν να οδηγήσουν σε οικονομία μέχρι 25 % [3], [4].

Φυσικά ο σχεδιασμός και η μελέτη της ψυκτικής μονάδας που έχουν και τις μεγαλύτερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας προηγείται της κατασκευής, της εκμετάλλευσης και της συντήρησης. Στη συνέχεια, χωρίς να υπεισέλθουμε σε πολύπλοκους μηχανισμούς βελτιστοποίησης, θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα με το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας ψυκτικής μονάδας, προσπαθώντας ν' αναδείξουμε τα κυριότερα σημεία από τα οποία αναμένεται να εξοικονομηθεί ενέργεια.

2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

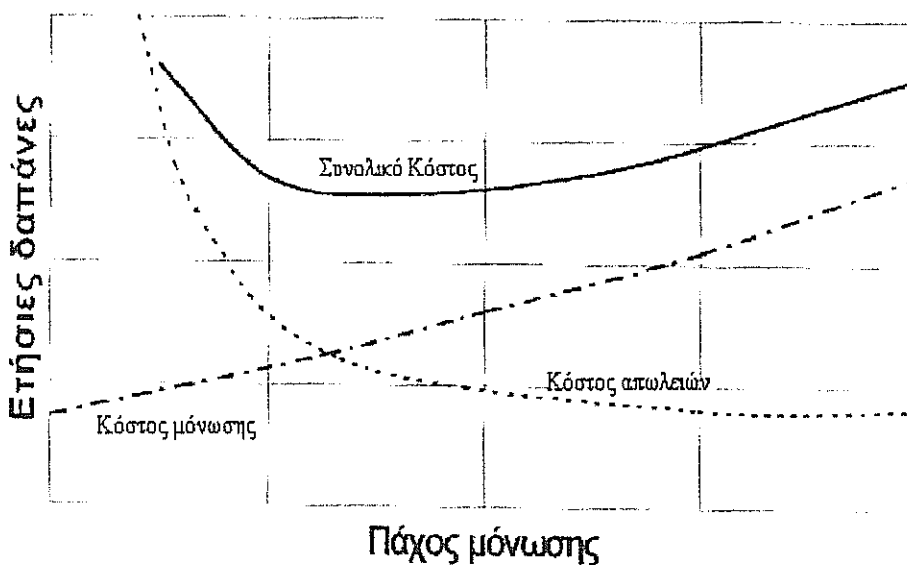
Βασικό μέλημα κατά τη σύνταξη της μελέτης μιας ψυκτικής μονάδας είναι η σωστή επιλογή της μεθόδου και ο ακριβής υπολογισμός των ψυκτικών φορτίων. Αυτά τα δύο και μόνο στοιχεία μπορούν να οδηγήσουν σε οικονομία τουλάχιστον της τάξεως του 30 % [9]. Η επιλογή ή όχι της χρήσης πρόψυξης μεταβάλλει και την κατανάλωση ενέργειας. Η ανάλυση του θερμοδυναμικού κύκλου και η επιλογή του ψυκτικού ρευστού και των συνθηκών λειτουργίας οδηγούν σε διαφορετικές αποδόσεις και συνεπώς σε λιγότερο ή περισσότερο οικονομικές λύσεις. Φυσικά άξια μελέτης είναι και η πιθανότητα χρήσης στο κύκλωμα συστήματος ανάκτησης θερμότητας ή κάποιας αποθήκης ενέργειας. Ιδιαίτερη βαρύτητα πρέπει να δίνεται τέλος στην επιλογή των

συστημάτων ελέγχου και αυτοματισμού, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην πλέον εύρυθμη, ευκολότερη και οικονομικότερη λειτουργία της εγκατάστασης.

2.1 Κτίριο – Ψυκτικοί θάλαμοι – Μονώσεις

Ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του κτιρίου και για την αντιμετώπιση των ποικίλων θερμομονωτικών και τεχνικών προβλημάτων θα πρέπει απ' την αρχή να αποφασισθεί εάν η μόνωση σε σχέση με το σκελετό του κτιρίου θα είναι εσωτερική ή εξωτερική.

Η τεχνικοοικονομική συγκριτική μελέτη μεταξύ κόστους μόνωσης και αντιστοίχου κόστους θερμικών απωλειών (Σχήμα 1) θα οδηγήσει στο οικονομικό πάχος μόνωσης, για το οποίο το σύνολο ανά έτος των δαπανών ενέργειας και κτιριακών εγκαταστάσεων παίρνει την ελάχιστη τιμή.



Σχήμα 1. Υπολογισμός οικονομικού πάχους μόνωσης

Ο καλύτερος δυνατός προσανατολισμός σε συνδυασμό με μια ανακλαστική βαφή των εξωτερικών παρειών θα βοηθήσουν στην μικρότερη είσοδο θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας.

Η σωστή διαστασιοποίηση των θαλάμων, ο καλός σχεδιασμός των προθαλάμων και η πρόβλεψη κλιματισμού των διαδρόμων θα περιορίσουν τις απώλειες ενέργειας.

2.2 Σύστημα και διαδικασία

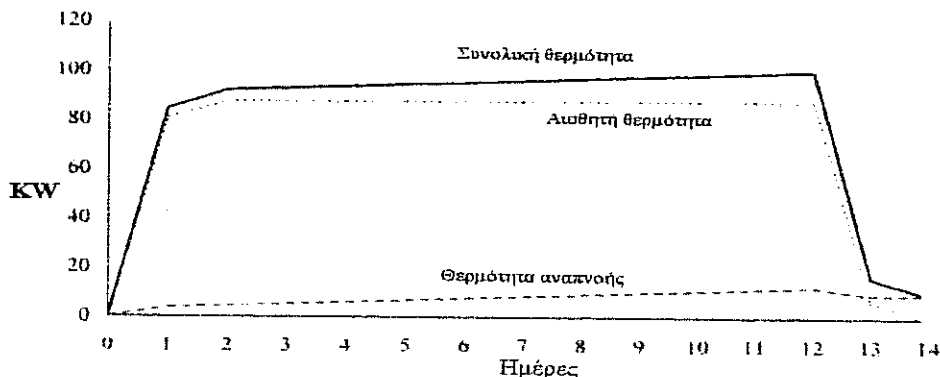
Μετά την εξέταση των παραγόντων και των στοιχείων που συναινούν στην σκοπιμότητα κατασκευής της ψυκτικής μονάδας, πρέπει να εξετασθεί το ενεργειακό πρόβλημα. Έτσι πρέπει να επιλεγεί το σύστημα ψύξης (ψυκτική μηχανή συμπίεσης, ψυκτική μηχανή απορρόφησης κλπ), το επί μέρους είδος συμπίεσης (π.χ. ψυκτική μηχανή δυο επιπέδων συμπίεσης) και να εξεταστεί αν υπάρχει παράλληλη ανάγκη ψύξης και θέρμανσης (θερμοψυκτική αντλία), ανάγκη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (π.χ. παραγωγή πάγου σε γαλακτοβιομηχανία) ή ανάγκη ανάκτησης θερμότητας (π.χ. για ζεστό νερό σε γαλακτοβιομηχανία, βιομηχανία αλλαντικών ή σφαγείο).

Πολλές φορές η αλλαγή ή προσαρμογή μιας βιομηχανικής διαδικασίας οδηγεί σε σημαντική οικονομία ενέργειας. Έτσι η αποστέωση του κρέατος πριν την ψύξη οδηγεί σε εξοικονόμηση 25-30% ενέργειας και 50-70% ψυκτικών χώρων [9], αρκεί βεβαίως να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για να αποφευχθεί η σκλήρυνση του κρέατος. Σε μια μονάδα συντήρησης κατεψυγμένων, για τα προϊόντα που δεν διατρέχουν ιδιαίτερο κίνδυνο (οξειδωσης) μπορούν να συντηρούνται σε θερμοκρασίες $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ και μόνο τα παχιά κρέατα και ψάρια ν' απαιτούν μονίμως θερμοκρασίες $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Έτσι είναι εύκολη μια οικονομία της τάξης του 8-10% [9].

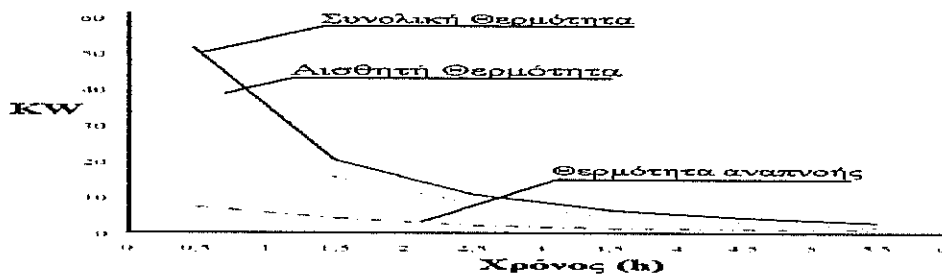
2.3 Ανάλυση και έλεγχος θερμικών φορτίων

Σημαντικότερη σημασία στη μελέτη κατέχει ο υπολογισμός των φορτίων. Στην περίπτωση των νωπών φυτικών προϊόντων, το ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι "τι πρέπει να υιοθετηθεί η πρόψυξη ή η ψύξη στους θαλάμους". Πριν απ' όλα πάντως πρέπει να γίνει ανάλυση και ακριβής υπολογισμός των φορτίων, πράγμα που στην καθημερινή πρακτική δεν γίνεται, με αποτέλεσμα την χρήση μηχανημάτων μεγαλύτερης ισχύος και την άσκοπη συχνά κατανάλωση ενέργειας.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων το κατέχει η αισθητή θερμότητα κατά κύριο λόγο και η θερμότητα αναπνοής δευτερευόντως [7].



Σχήμα 2. Μεταβολή των φορτίων αισθητής θερμότητας και αναπνοής



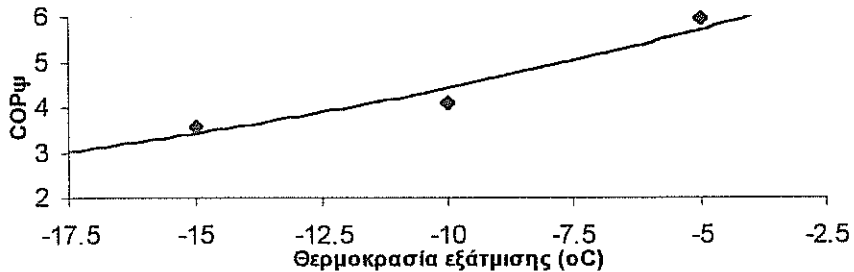
Σχήμα 3. Μεταβολή της ισχύος αισθητής θερμότητας και αναπνοής στο προψυκτήριο για μια παρτίδα προψυχομένων προϊόντων

Κατά την ημέρα της μεγάλης ζήτησης, που συνήθως είναι η τελευταία ημέρα πλήρωσης του ψυκτικού θαλάμου, η αισθητή θερμότητα μαζί με την θερμότητα αναπνοής αντιπροσωπεύουν μαζί το 65 έως 85% του συνόλου των φορτίων [7], (Σχήμα 2) ενώ

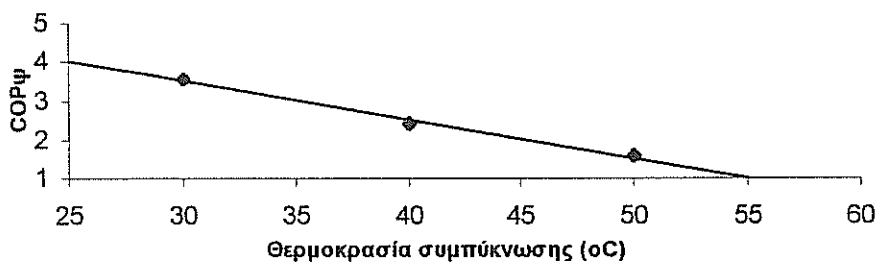
στην περίπτωση ενός προψυκτηρίου οι δυο αυτές κατηγορίες θερμότητας μαζί, αντιπροσωπεύουν το 92-98% του όλου φορτίου [7] (Σχήμα 3). Η ύπαρξη προψυκτηρίου καθιστά την εγκατάσταση ακριβότερη και το κόστος λειτουργίας της μεγαλύτερο.

2.4 Ανάλυση του ψυκτικού κύκλου

Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά μιας ψυκτικής μηχανής ξηράς εκτόνωσης είναι: η θερμοκρασία και πίεση εξάτμισης, η θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης, η υπόψυξη του ψυκτικού υγρού, η υπερθέρμανση των ατμών και τέλος οι απώλειες κατά τον στραγγαλισμό της πίεσης.



Σχήμα 4. Μεταβολή του ψυκτικού COP με την θερμοκρασία εξάτμισης.

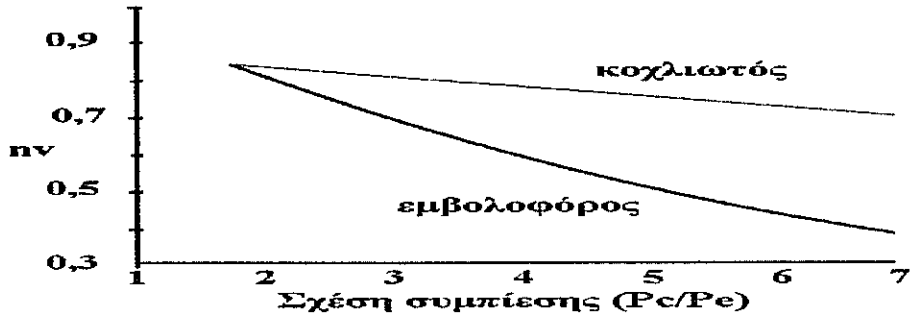


Σχήμα 5. Μεταβολή του ψυκτικού COP με την θερμοκρασία συμπύκνωσης

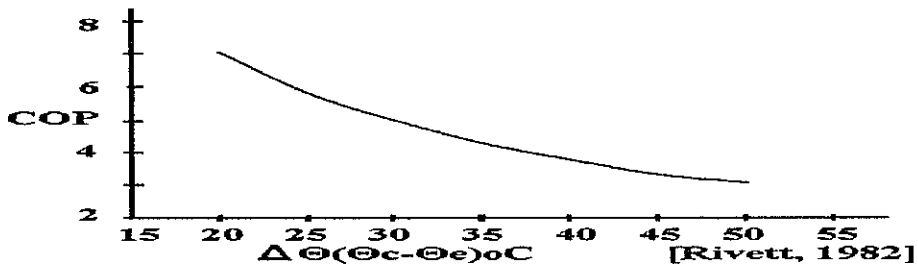
Η μείωση της θερμοκρασίας εξάτμισης οδηγεί σε περιορισμό της ψυκτικής ισχύος, αύξηση της απορροφούμενης μηχανικής ισχύος και τελικά σε πτώση του συντελεστή ψυκτικής συμπεριφοράς (Σχήμα 4), ενώ παράλληλα η αύξηση του τίτλου του μίγματος ατμού - υγρού δεν ευνοεί την καλύτερη εκμετάλλευση του ειδικού ψυκτικού έργου. Σε παρόμοια αποτελέσματα οδηγούν και οι υψηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης (Σχήμα 5), ενώ τόσο η μείωση της θερμοκρασίας εξάτμισης όσο και η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης έχουν σαν συνέπεια την αύξηση της σχέσης συμπίεσης η οποία ποτέ δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5:1, διότι επηρεάζει αρνητικά τον ογκομετρικό (Σχήμα 6) και τον ενδεικνυμένο βαθμό απόδοσης. Ίσως μια συσχέτιση του COP με τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών συμπύκνωσης και εξάτμισης (Σχήμα 7) είναι πιο χρήσιμη για εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την απόδοση, την οικονομικότητα λειτουργίας και ως προς το εάν η εγκατάσταση θα είναι μονοβάθμια ή διβάθμια.

Η αύξηση της υπόψυξης οδηγεί σε αύξηση της ψυκτικής ισχύος και του ψυκτικού συντελεστή συμπεριφοράς (Σχήμα 8) ενώ η υπερθέρμανση των ατμών μειώνει ελαφρώς τον συντελεστή συμπεριφοράς. Μεγάλες υπερθερμάνσεις γενικώς αποφεύγονται όταν

πρόκειται για ψυκτικά ρευστά με υψηλό $\gamma = C_p / C_v$ όπως συμβαίνει π.χ. με την αμμωνία. Τέλος οι ενεργειακές απώλειες κατά τον στραγγαλισμό, που μπορεί να υπερβαίνουν το 30% σε μοντέρνα ψυκτικά συγκροτήματα με κοχλιωτούς συμπιεστές μπορούν και πρέπει να περιορίζονται με ανάκτηση του έργου εκτόνωσης, με υπόψυξη του υγρού πριν την εκτόνωση ή με σταδιακό στραγγαλισμό και επανασυμπίεση.



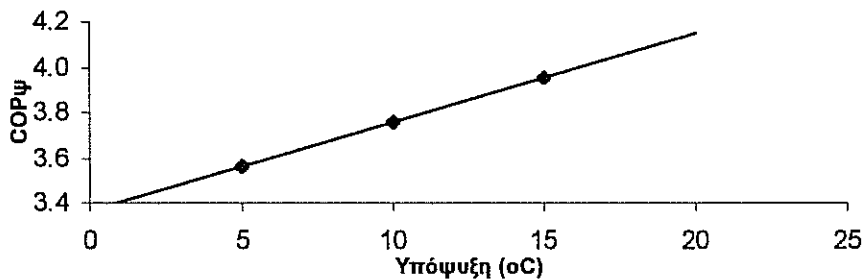
Σχήμα 6. Μεταβολή του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης με την σχέση συμπίεσης, για κοχλιωτό και εμβολοφόρο συμπίεστή



Σχήμα 7. Μεταβολή του ψυκτικού COP με την διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών συμπύκνωσης και εξάτμισης

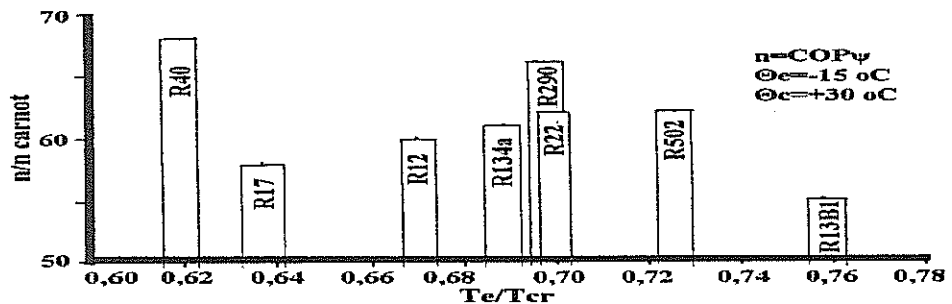
2.5 Επιλογή ψυκτικού ρευστού.

Για την επιλογή ενός ψυκτικού ρευστού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, θα ληφθούν υπ' όψη ορισμένα κριτήρια όπως θερμοδυναμικά, οικολογικά, κριτήρια ασφαλείας, φυσικά και τεχνικά κριτήρια και τέλος οικονομικά κριτήρια.



Σχήμα 8. Μεταβολή του ψυκτικού COP με την θερμοκρασία υπόψυξης

Στην επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού ρευστού θα βοηθήσει η συγκριτική κατάταξη των υποψηφίων ψ. ρευστών (Σχήμα 9) με κύρια κριτήρια το σχετικό συντελεστή συμπεριφοράς $\eta / \eta_{\text{COPn}}$ και την απόσταση του κύκλου από την κρίσιμη περιοχή.



Σχήμα 9. Επιλογή ψυκτικού ρευστού με βάση την σχετική απόδοση για κάθε ψυκτικό ρευστό και την σχετική θερμοκρασιακή διαφορά της εφαρμογής από την κρίσιμη θερμοκρασία.

Στο σχήμα 10, όσο ψηλότερα βρίσκεται ένα ψυκτικό ρευστό, τόσο μεγαλύτερη είναι η ψυκτική του παραγωγή ανά μονάδα αναρροφούμενου όγκου αερίου, ενώ όσο δεξιότερα είναι τοποθετημένο το ρευστό τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση στην αναρρόφηση [1]. Τα δύο τελευταία σχήματα βοηθούν στην επιλογή του καταλληλότερου ψυκτικού ρευστού με βάση θερμοδυναμικά κριτήρια.

Στη περίπτωση αλλαγής ψυκτικού ρευστού σε παλαιά εγκατάσταση, η μείωση της ψυκτικής ικανότητας μπορεί να φθάσει το 25% της αρχικής [2].

2.6 Αποπάγωση και σύστημα ελέγχου

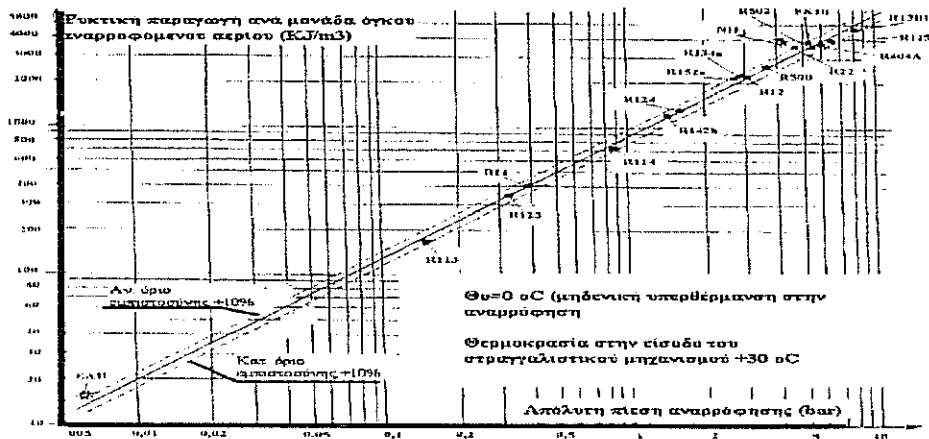
Το πόσο συχνά πρέπει να αποπαγώνεται ένας εξατμιστής εξαρτάται από τον τύπο του, τη φύση της εγκατάστασης, τις συνθήκες λειτουργίας και τη μέθοδο αποπάγωσης. Ένας μεγάλος γυμνού τύπου εξατμιστής (οροφής) αποπαγώνεται 1-2 φορές το μήνα, ενώ ένας πτερυγοφόρος αεροψυκτήρας ψυκτικού θαλάμου συνήθως αποπαγώνεται 1-2 φορές την ημέρα. Το ενεργειακό κόστος αποπάγωσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, πολλές δε φορές είναι δεκάδες έως εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο από το κόστος της θεωρητικά απαραίτητης θερμαντικής ενέργειας αποπάγωσης [6], προς τη τιμή της οποίας πρέπει να τείνει ένας ορθολογικός σχεδιασμός αποπάγωσης.

Το σύστημα ελέγχου που θα σχεδιασθεί (και στη συνέχεια θα εγκατασταθεί) πρέπει να είναι ικανό να εκκινήσει, να διακόψει, να ρυθμίσει και να προστατέψει την ψυκτική εγκατάσταση όποτε πρέπει. Ένας καλός προγραμματισμός, σε συνδυασμό με τη σωστή επιλογή του πεδίου λειτουργίας και την ικανοποιητική ευαισθησία λειτουργίας της κάθε διάταξης μπορεί να διευκολύνει αλλά και να καταστήσει οικονομικότερη τη λειτουργία της μονάδας.

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη διαφανεί, τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας κατά τον σχεδιασμό μιας ψυκτικής εγκατάστασης είναι σημαντικά. Η σωστή επιλογή της μόνωσης και η προστασία από τα ηλιακά φορτία μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση έως 10% της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η ορθή επιλογή των συνθηκών συντήρησης / λειτουργίας

και η σωστή μελέτη του ψυκτικού κύκλου μπορεί να οδηγήσουν σε ενεργειακά κέρδη της τάξεως του 18%, ενώ η επιλογή του συστήματος ή της διαδικασίας σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και 30 %. Η ανάλυση και ο έλεγχος των θερμικών φορτίων μιας μονάδας οδηγεί στη σωστή διαστασιοποίηση της ψυκτικής εγκατάστασης που πολλές φορές έχει διπλάσια ισχύ της απαιτούμενης. Η εκλογή του ψυκτικού ρευστού πρέπει να γίνει σήμερα όχι μόνο με θερμοδυναμικά, τεχνικά και οικονομικά αλλά και με οικολογικά κριτήρια, ενώ δεν θα πρέπει να αμεληθεί το σύστημα ελέγχου και αποπάγωσης.



Σχήμα 10. Μεταβολή, σε συνάρτηση με την πίεση αναρρόφησης, της ψυκτικής παραγωγής ανά μονάδα όγκου αναρροφόμενου αερίου διαφόρων ψυκτικών ρευστών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Duminil M. 1994. Criteres objectifs de choix d' un frigorigene. *Revue Pratique du Froid*. 808. 18-24.
2. Kitchener A. 1996. Advances in refrigeration machinery, *Proc. of IIR Com. E2, E1, B1, B2*, Melbourne. IIR Bulletin 1996/1. 121-135.
3. Λαμπρινός Γρ.. 1986. Οικονομία ενέργειας στους ψυχόμενους και κλιματιζόμενους χώρους. *Πρακτικά ημερίδας του ΕΛΚΕΠΑ με θέμα: Ηλιακή ενέργεια και εξοικονόμηση ενέργειας*. Ιωάννινα. 13-26.
4. Λαμπρινός Γρ.. 1993. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ψυκτικής