ΝΔ: 18432.
ΚΩΕ: 18301.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΤΡΙΑ ΜΑΡΙΑ ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ-ΜΑΚΡΑΝΤΩΝΑΚΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης

ΧΡΗΣΤΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ
Γεωπόνος Μεταπτυχιακής Ειδίκευσης

ΒΟΛΟΣ 2009

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Αρδεύσεις-Στραγγίσεις-Υδραυλική», Επιβλέπουσα της διατριβής.

Τζιμόπουλος Χρήστος, Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργική Υδραυλική», μέλος.

Καραντούνιας Γεώργιος, Καθηγητής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, μέλος.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Αρδεύσεις-Στραγγίσεις-Υδραυλική», Επιβλέπουσα της διατριβής.

Τζιμόπουλος Χρήστος, Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργική Υδραυλική», μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

Καραντούνιας Γεώργιος, Καθηγητής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

Ζαλίδης Γεώργιος, Καθηγητής, Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με γνωστικό αντικείμενο «Ρύπανση και Υποβάθμιση Εδαφών», μέλος.

Δημήρκου Ανθούλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Εδαφολογία με Έμφαση στη Χημεία Εδάφους», μέλος.

Καλαβρουζιώτης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, με γνωστικό αντικείμενο «Σχεδιασμός και Διαχείριση γης», μέλος.

Κανακούδης Βασίλειος, Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Διαχείριση Υπόγειων Υδατικών Πόρων», μέλος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Χρήστος Δ. Παπανικολάου

Μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ISBN:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παπανικολάου, Χ. 2009. Μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Μαγνησίας.
Αριθμός προκαταρκτικών σελίδων: 23
Συνολικός αριθμός σελίδων: 319
Αριθμός πινάκων: 26
Αριθμός εικόνων: 55
Αριθμός βιβλιογραφικών παραπομπών: 365

Η χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας έχει δημιουργήσει προβλήματα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή και άλλα. Παράλληλα η εξάντληση των αποθεμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα, καθιστούν επιτακτική τη χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Παγκόσμιες συμφωνίες, ευρωπαϊκές οδηγίες και εθνικές νομοθεσίες επιβάλλουν, προτείνουν και ενθαρρύνουν την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η Βιομάζα αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία μαζί με την αιολική, την ηλιακή και άλλες χαρακτηρίζεται ως πράσινη πηγή ενέργειας και συμβάλλει στην κάλυψη μέρους των συνεχώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών.

Η σπατάλη του νερού, κυρίως από τη εφαρμογή των αλόγιστων αρδεύσεων, επιβάλει την λήψη μέτρων αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Η χρήση μεθόδων αποδοτικότερης εφαρμογής του αρδευτικού νερού, ο ακριβής υπολογισμός των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και η καλλιέργεια φυτών που δείχνουν ανοχή στην έλλειψη νερού αποτελούν μερικά από τα μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος της σπατάλης του νερού. Μια από τις μεθόδους αποδοτικής εφαρμογής του αρδευτικού νερού είναι και η στάγδην άρδευση,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

επιφανειακή και υπόγεια. Η υπόγεια στάγδην άρδευση αποτελεί παραλλαγή της αντίστοιχης επιφανειακής εφαρμόζοντας το αρδευτικό νερό δια μέσω σταλακτηφόρων αγωγών που τοποθετούνται σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο συνδυασμός των μεθόδων αυτών με τεχνολογικά επιτεύγματα συνεπάγεται την μείωση του κόστους παραγωγής υπό την προϋπόθεση ότι τα συστήματα οργανώνονται, λειτουργούν και συντηρούνται κανονικά.

Η εκπόνηση της παρούσας έρευνας έγινε για να αξιολογηθεί: α) η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών, β) η επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης με τις μεθόδους της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του φυτού σόργου, γ) η μέθοδος επιφανειακής στάγδην άρδευσης με την χρήση αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους, δ) η επίδραση διαφορετικών δόσεων άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του ενεργειακού φυτού σόργου, ε) η σύγκριση της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού στο σόργο, στ) η σύγκριση της εφαρμογής τριών δόσεων άρδευσης με τη μέθοδο της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους οικονομικούς, ζ) η μέθοδος υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία με το πρόγραμμα AutoCAD, η) η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής της καλλιέργειας με την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου, του νομού Μαγνησίας. Στον συγκεκριμένο πειραματικό αγρό πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος στάγδην άρδευσης καθώς και η τοποθέτηση των αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας αλλά και του συστήματος πλήρους αυτοματοποίησης της επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Το έδαφος ήταν αμμοπηλώδες έως αργιλοπηλώδες.

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν πλήρως τυχαιοποιημένες ομάδες με επτά μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν: α) Υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με 100%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

των αναγκών της καλλιέργειας (Υ100), β) Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη δόση άρδευσης ίση με το 70% της ΕΤ (Υ70), γ) Υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ (Υ50), δ) Επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με το 100% της ΕΤ (Ε100), μάρτυρας, ε) Επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με το 70% της ΕΤ (Ε70), στ) Επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ (Ε50), ζ) Πλήρως αυτοματοποιημένη επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας.

Οι αγωγοί εφαρμογής για το υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης τοποθετήθηκαν με ειδικό υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45m. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους ήταν πολυαιθυλένιο, και η διάμετρός τους ήταν 20mm ενώ η ισαποχή τους ήταν 1,6m. Οι αγωγοί εφαρμογής είχαν ενσωματωμένους αυτοκαθαριζόμενους και αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες με παροχή 2,3L/h σε ένα εύρος πίεσης μεταξύ 0,5 έως 1,0Atm.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε με την μεθοδολογία του εξατμισίμετρου τύπου Α. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης για τις μεταχειρίσεις στις οποίες καλύπτονταν το σύνολο των αναγκών τους σε νερό (Ε100 και Υ100). Η δόση άρδευσης στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά υπολογίστηκε ως ποσοστό της πλήρους δόσης άρδευσης. Στη μεταχείριση Α100 η δόση άρδευσης καθορίστηκε από τον ρυθμό εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας όπως αυτή καταγράφονταν από τον αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους. Η άρδευση των έξι από τις επτά μεταχειρίσεις γινότανε κάθε δύο ημέρες σύμφωνα με τις ενδείξεις του εξατμισίμετρου τύπου Α ενώ στη μεταχείριση Α100 καθορίζονταν από το ρυθμό εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας. Ο μέσος όρος εξοικονόμησης νερού μεταξύ των ζευγών μεταχειρίσεων Ε50-Υ50, Ε70-Υ70 και Ε100-Υ100 ήταν 18,7%, 16,7% και 9,4% αντίστοιχα υπέρ της υπόγειας στάγδην άρδευσης. Ειδικά στην περίπτωση της μεταχείρισης Α100 η μέση εξοικονόμηση νερού τη διετία 2008-2009 φτάνει το 10,1% σε σύγκριση με τη μεταχείριση Ε100.

Για την μοντελοποίηση των παραγωγικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας που μελετήθηκαν στην παρούσα έρευνα ήταν το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ύψος του κεντρικού στελέχους του φυτού, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και η παραγωγή ξηρής βιομάζας. Το πρόβλημα το οποίο προέκυψε ήταν πολυπαραμετρικό και εντόνως μη γραμμικό. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος το μη γραμμικό μοντέλο γραμμικοποιήθηκε με την εφαρμογή λογαριθμοποίησης με βάση το φυσικό λογάριθμο (ln) σε όλες τις τιμές των παραμέτρων και στη συνέχεια στο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Multiple Regression). Το ύψος του φυτού, ο LAI και η ξηρή βιομάζα αποτελούσαν τις εξαρτημένες μεταβλητές (Y) ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άρδευση (X_1), η βροχόπτωση (X_2), η ηλιοφάνεια (X_3), η βροχόπτωση (X_3), η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (X_4), η υγρασία εδάφους (X_5), η υγρασία ατμόσφαιρας (X_6), και η διάρκεια της ημέρας.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά σε σύγκριση με αυτές που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης συμπεριλαμβανομένης και της μεταχείρισης Υ70. Οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν ελλειμματικά και αυτών που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης ήταν σημαντικές. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων LAI με τη μέθοδο SunScan και η εμβαδομέτρηση με το πρόγραμμα AutoCAD έδειξε ότι δεν υπήρχαν διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Στις μεταχειρίσεις Ε100, Υ100 και Υ70 ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας εξαρτάται από την άρδευση και την βροχόπτωση. Αντίθετα, στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας εξαρτάται από την άρδευση και από την εδαφική υγρασία.

Κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ανάπτυξη των φυτών. Τα φυτά που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση ήταν ψηλότερα σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκα με επιφανειακή. Αντίστοιχα, τα φυτά που αρδεύτηκαν πλήρως παρουσίασαν μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Επιπλέον φαίνεται καθαρά από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ότι το ύψος των φυτών εξαρτάται από την άρδευση και μόνο.

Η μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης και δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης. Η μέση μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ100. Οι μεταχειρίσεις Ε70, Υ50 και Ε50 έδωσαν ικανοποιητική απόδοση. Στις μεταχειρίσεις

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Ε100 και Α100 δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά τη διετία 2008-2009. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης φαίνεται ότι η ξηρή βιομάζα εξαρτάται από την άρδευση και μόνο. Η παραγωγή ενέργειας επηρεάστηκε κατά παρόμοιο τρόπο με την παραγωγή ξηρής βιομάζας από την εφαρμογή των διαφόρων δόσεων και μεθόδων άρδευσης. Το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό για το σύνολο των μεταχειρίσεων. Μια τάση υπεροχής φαίνεται να παρουσιάζει η μεταχείριση Υ70 η οποία δίνει μεγαλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Α100, Ε50, Ε70, Ε100, Υ50 και Υ100 αντίστοιχα. Στη μεταχείριση Ε50 το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό και αρκετά υψηλό παρόλο που οι ανάγκες της καλλιέργειας καλύφθηκαν μόνο κατά το 50%.

Από τη μελέτη των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας φαίνεται ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση διατηρεί την εδαφική υγρασία σε υψηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη επιφανειακή στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Δεν παρατηρήθηκε βαθιά διήθηση κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας ενώ στη μεταχείριση Ε50 η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα κατά την περίοδο της άνθησης που το σόργο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην έλλειψη νερού. Ειδικά για τη μεταχείριση Α100 η διακύμανση της μέσης εδαφικής υγρασίας ήταν σταθερή και κυμάνθηκε μεταξύ 24% και 32%κ.ο. που ήταν και τα όρια λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος άρδευσης. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της εμβαδομέτρησης του ριζικού συστήματος φαίνεται ότι αυτό δεν επηρεάστηκε από τη συχνότητα των αρδεύσεων. Η ανάπτυξή της ρίζας έφτασε έως το βάθος των 50cm τουλάχιστο. Επομένως το φυτό ανέπτυξε ριζικό σύστημα τουλάχιστο έως το βάθος του υπόγειου αγωγού εφαρμογής ενώ η μέγιστη πυκνότητα ριζών παρατηρήθηκε στα 30cm. Από τη μελέτη που έγινε προέκυψε ότι η ρίζα κάλυψε επιφάνεια 466cm^2, το μέγιστο μήκος των ριζικών τριχιδίων έφτανε τα 50cm ενώ το μέγιστο πλάτος έφτανε τα 35cm.

Από τη μελέτη της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) προκύπτει ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Μεταξύ των μεταχειρίσεων, η αποδοτικότητα χρήσης νερού ήταν μεγαλύτερη στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 η μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ70.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε περιελάμβανε μελέτη της ακαθάριστης προσόδου, των άμεσων δαπανών, του άμεσου κόστους παραγωγής και του ακαθάριστου κέρδους. Ως προς τις οικονομικές παραμέτρους που μελετήθηκαν η υπόγεια στάγδην άρδευση υπερέχει της επιφανειακής. Το επιπλέον κόστος για την αγορά του εξοπλισμού της μεταχείρισης Α100 δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την οικονομικότητα της καλλιέργειας σε σύγκριση με την μεταχείριση Ε100.

Από την έρευνα προκύπτει ότι εφαρμογή κατάλληλων καλλιεργητικών τεχνικών σε συνδυασμό με τη χρήση σύγχρονης τεχνολογίας αυξάνουν το οικονομικό όφελος για τον παραγωγό. Εάν στα παραπάνω συνυπολογιστεί το περιβαλλοντικό όφελος από την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και την διατήρηση σταθερού του ισοζυγίου διοξειδίου του άνθρακα τότε γίνεται αντιληπτό ότι η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη καλλιέργεια ιδιαίτερα υπό συνθήκες εφαρμογής γεωργίας χαμηλών εισροών, ελλειμματικής άρδευσης και εφαρμογής νέων τεχνολογιών πλήρους αυτοματοποίησης των αρδεύσεων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν έναν κρίσιμο φυσικό πόρο απαραίτητο για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει στην μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω των αυξημένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και αρωματικών υδρογονανθράκων αλλά και στην επιβάρυνση των οικονομιών των εξαρτημένων, από αυτά, χωρών με τις συνεχείς αυξομειώσεις στην τιμή τους. Η ανάγκη για παραγωγή «καθαρής» ενέργειας οδηγεί στην αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς την κατεύθυνση αυτή.

Το νερό αποτελεί έναν άλλο κρίσιμο φυσικό πόρο που είναι απαραίτητος για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, σήμερα οι υδατικοί πόροι καθίστανται ανεπαρκείς λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της επέκτασης των αρδευόμενων εκτάσεων, και της βιομηχανικής ανάπτυξης. Η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού (70% σε παγκόσμιο επίπεδο και πάνω από 80% στις περισσότερες Μεσογειακές χώρες και πάνω από 87% στην Ελλάδα). Επομένως, η έλλειψη νερού και η ταυτόχρονη σπατάλη που παρατηρείται κατά τη χρήση του, κυρίως στην εφαρμογή των αρδεύσεων, οδηγεί στην ανάγκη για εφαρμογή μεθόδων άρδευσης, οι οποίες εφαρμόζουν αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Μια από τις μεθόδους αποδοτικής εφαρμογής του νερού άρδευσης είναι και στάγδην άρδευση, επιφανειακή και υπόγεια, η οποία όταν σχεδιάζεται, εφαρμόζεται και συντηρείται κατάλληλα οδηγεί σε εξοικονόμηση νερού και ενέργειας. Στις περιπτώσεις που η μέθοδος αυτή συνδυάζεται και με εφαρμογή νέων τεχνολογιών το θετικό αποτέλεσμα μεγιστοποιείται.

Στο πλαίσιο που καθορίζουν οι παραπάνω επισημάνσεις εντάσσεται η παρούσα έρευνα. Η έρευνα αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας υπό μορφή διδακτορικής διατριβής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Τον θεμελιώδη ρόλο στην εκπόνηση της συγκεκριμένης διατριβής έπαιξε η κ. Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Διευθύντρια του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής. Ως επιβλέπουσα της διατριβής, με καθοδήγησε αλλά και μου συμπαραστάθηκε αμέριστα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της έρευνας. Την ευχαριστώ θερμά για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω ως υποψήφιος διδάκτορας στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια, για το χρόνο που διέθεσε, για τη φιλική της διάθεση αλλά και για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε.

Θα ήθελα να εκφράσω επίσης τις θερμότερες ευχαριστίες μου:

Στον κ. Χρήστο Τζιμόπουλο, Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ο οποίος λόγω της πολύτιμης και αξιόλογης επιστημονικής του εμπειρίας, μου έκανε σημαντικότατες υποδείξεις και μου έδωσε χρήσιμες συμβουλές υπό την ιδιότητα του μέλους της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής. Τον ευχαριστώ για το χρόνο που διέθεσε, για την βοήθεια που μου πρόσφερε στη διαχείριση της μεθόδου υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD αλλά κυρίως για την καθοδήγηση, συμπαράσταση και υποστήριξη σε κρίσιμες περιόδους της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Στον κ. Γεώργιο Καραντούνια, Καθηγητή του Τομέα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για τις υποδείξεις και τον χρόνο που διέθεσε υπό την ιδιότητα του μέλους της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής , στον κ. Γεώργιο Ζαλίδη, Καθηγητή του Τομέα Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, του Τμήματος Γεωπονίας, της Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στην κ. Ανθούλα Δημήρκου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στον κ. Ιωάννη Καλαβρουζιώτη, Επίκουρο Καθηγητή, του Τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και στον κ. Βασίλειο Κανακούδη, Λέκτορα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στον κ. Ευθύμιο Μυγδάκο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Διοίκησης Επιχειρήσεων Αγροτικών Προϊόντων και Τροφίμων, της Σχολής Διαχείρισης Φυσικών Πόρων και Επιχειρήσεων, για την πολύτιμη και καθολική συμβολή του στην οικονομική μελέτη που πραγματοποιήθηκε και τις οικονομικές γνώσεις που μου μετέδωσε.

Στην ομάδα του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής , κ. Νικόλαο Παπανίκο, ΕΕΔΙΠ του Εργαστηρίου, στην Δρα Αναστασία Αγγελάκη και στους υποψήφιους διδάκτορες κ.κ. Δημήτριο Παπαλέξη, Ιωάννη Βαγενά και Δημήτριο Δημάκα.

Στον υπεύθυνο του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, κ. Σπύρο Σουίπα, στο κ. Δημήτριο Τόλια και στον κ. Ιωάννη Αλεξίου, ερευνητή του Ινστιτούτου Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας, του ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε. για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Τέλος ευχαριστώ του γονείς μου για την κατανόηση που επέδειξαν και την ηθική στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής αυτής.

Βόλος 2009

Χρήστος Δ. Παπανικολάου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η παρούσα διατριβή έγινε στο πλαίσιο στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Το έργο συγχρηματοδοτείται

- **80% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο**
- **20% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας**
- **και από τον Ιδιωτικό Τομέα**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ III

ΠΡΟΛΟΓΟΣ IX

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ XIII

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ XX

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ XXII

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{Ο} : ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1. ΓΕΝΙΚΑ 1

1.2. ΣΚΟΠΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ 8

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 14

1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ 15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο}: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 17

2.1. ΓΕΝΙΚΑ 17

2.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ 18

2.2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ 18

2.2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 20

2.2.3. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 21

2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 22

2.3.1. ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΙΣΑΠΟΧΗ ΑΓΩΓΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 22

2.3.2. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 26

2.3.3. ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 26

2.3.4. ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ 28

2.3.5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ 30

2.3.6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ 31

2.3.7. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ 33

2.3.8. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ (WUE) 34

2.3.9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 35

2.3.10. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 38

2.4. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ 40

2.4.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ 40

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2.4.2. ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΖΥΜΩΝ 41
2.4.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ 42
2.5. Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΙΝΩΔΟΥΣ ΣΟΡΓΟΥ 43
2.5.1. ΓΕΝΙΚΑ 43
2.5.2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ 44
2.5.3. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ 45
2.5.3.1 Προετοιμασία του Εδάφους 45
2.5.3.2 Λιπαντικές Απαιτήσεις 45
2.5.3.3 Σπορά 46
2.5.3.4 Έλεγχος Ζιζανίων 46
2.5.3.5 Συγκομιδή 47
2.5.4. ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ 48
2.5.5. ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΒΟΛΕΣ 51
2.5.5.1 Μυκητολογικές Ασθένειες 51
2.5.5.2 Εντομολογικές Προσβολές 53
2.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ 53
2.6.1. ΓΕΝΙΚΑ 53
2.6.2. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ 54
2.6.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 57
2.6.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΛΑΤΟΥΧΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ 58
2.6.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ 58
2.7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ 59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο}: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
Α. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 61
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 61
3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ 62
3.2.1. ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ 62
3.3. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ 66
3.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ 68
3.5. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 69
3.5.1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 69
3.5.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΥΦΥΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 74
3.6. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 75
3.6.1. ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ 75
3.6.2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ 75
3.6.2.1 Η Μέθοδος T.D.R 76
3.6.2.2 Μετρήσεις Εδαφικής Υγρασίας με το Σύστημα Moisture Point 78
3.6.2.3 Το Ευφυές Σύστημα Άρδευσης 80

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

3.7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ **85**
3.7.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ 85
3.7.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ 87
3.8. ΚΑΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ **88**
3.9. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ **89**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο}: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΟΣΕΩΝ **91**
4.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ **91**
4.2. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΗΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ **92**
4.2.1. ΕΞΑΤΜΙΣΗ (Ε) 92
4.2.2. ΔΙΑΠΝΟΗ (Τ) 93
4.2.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ΕΤ) 94
4.2.3.1 Παράγοντες που Επιδρούν στην Εξατμισοδιαπνοή 94
4.2.3.2 Ορισμοί και Έννοιες της Εξατμισοδιαπνοής 96
4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ **97**
4.3.1. ΤΟ ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟ 98
4.3.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Εξάτμιση απο Εξατμισίμετρο 98
4.3.1.2 Χαρακτηριστικά Εξατμισίμετρου Τύπου Α (PanA) 100
4.3.1.3 Τοποθέτηση, Διατήρηση, Συντήρηση, Λήψη Μετρήσεων 102
4.3.1.4 Διαδικασία Υπολογισμού της ETo με τη Χρήση Υπολογιστικού Φύλλου 104
4.4. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ (ETC) **106**
4.4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ET_C 106
4.4.1.1 Μέθοδος του Φυτικού Συντελεστή 106
4.4.1.2 Μέθοδος Άμεσου Υπολογισμού 106
4.4.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΦΥΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ 107
4.4.2.1 Στάδια Ανάπτυξης Καλλιέργειας 107
4.4.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΚC 109
4.4.3.1 Υπολογισμός του Διπλού Φυτικού Συντελεστή (Kcd) 109
4.4.3.2 Υπολογισμός Απλού Φυτικού Συντελεστή (Kc) 111
4.4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ETC – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΟΣΕΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 114
4.4.5. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΦΥΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 116
4.4.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ 118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{Ο}: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
Γ. ΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ **121**
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **121**
5.2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ **121**
5.2.1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ 124

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

5.3. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ 124
5.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΤΡΙΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ σ^2 127
5.5. ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 130
5.5.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ T-ΤΕΣΤ 130
5.5.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ (ANOVA) 133
5.6. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ 135
5.6.1. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ β_1 ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ β_0 135
5.6.2. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ 136
5.7. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΝΕΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ 137
5.8. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 139
5.8.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ 139
5.8.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2) 141
5.9. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ 142
5.10. ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ 146

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^{Ο}: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
Δ. ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ 147
6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 147
6.2. ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ 147
6.2.1. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ 149
6.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΚΤΙΜΗΤΗ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ σ^2 151
6.4. ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ 153
6.4.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 154
6.4.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2) ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2_{ADJ}) 155
6.4.3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΕ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Η ΟΜΑΔΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ 156
6.5. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 160
6.5.1. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 160
6.5.2. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ 161
6.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΝΕΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ 162
6.7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 163
6.7.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2) 163
6.7.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ 164
6.7.3. ΚΥΡΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ 166

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

6.8. ΜΟΡΦΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ 168
6.8.1. ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ 168
6.8.2. ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΕΙΚΤΕΣ 168
6.9. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 170
6.9.1. ΌΛΕΣ ΟΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΕΙΣ 171
6.9.2. ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ 173
6.9.3. ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ 174
6.9.4. ΟΠΙΣΘΟΔΡΟΜΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ 175

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^{Ο}: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ
Α. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ 177
7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 177
7.2. ΓΕΝΙΚΑ 177
7.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 178
7.3.1. ΦΥΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ 179
7.3.2. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ 183
7.4. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ 184
7.4.1. ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ 184
7.4.2. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ-ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ 185
7.4.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ- ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΟΡΓΟΥ 186
7.5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ 189
7.5.1. ΑΡΔΕΥΣΗ 189
7.5.2. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ 190
7.5.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ 191

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^{Ο}: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ
Β. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI) 193
8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 193
8.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ 193
8.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ LAI 194
8.2.1. ΑΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ 194
8.2.2. ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ 194
8.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ LAI 195
8.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 195
8.3.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI) 196
8.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ 200
8.3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΜΕΣΗΣ-ΕΜΜΕΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ LAI 203
8.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ 206

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^{Ο}: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Γ. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ **209**

9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **209**

9.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ **209**

9.2.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 209

9.2.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΦΥΤΩΝ 209

9.2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΦΥΤΟΥ 214

9.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ **218**

9.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 218

9.3.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ 218

9.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΒΙΟΜΑΖΑ 223

9.3.4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 234

9.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ **235**

9.4.1. ΥΨΟΣ ΦΥΤΟΥ 235

9.4.2. ΒΙΟΜΑΖΑ ΦΥΤΟΥ 236

9.4.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^{Ο}: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Δ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ **241**

10.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **241**

10.2. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ **241**

10.2.1. ΓΕΝΙΚΑ 241

10.2.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 242

10.2.3. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ 242

10.2.4. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ 242

10.2.5. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ 243

10.2.6. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΟΣΤΟΣ 243

10.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ **243**

10.3.1. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ 243

10.3.2. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ 245

10.3.3. ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΝΕΡΟΥ 248

10.3.4. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ 251

10.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ **252**

10.4.1. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ 253

10.4.2. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ 253

10.4.3. ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΝΕΡΟΥ 254

10.4.4. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ 255

10.4.5. ΣΗΜΕΙΟ ΙΣΟΣΚΕΛΙΣΜΟΥ ΕΣΟΔΩΝ-ΕΞΟΔΩΝ 256

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^{Ο}: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ 259
11.1. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 259
11.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ 275
11.3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ 278

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 281
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 281
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 285

ABSTRACT 315

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σελίδα

1.1: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε Ktoe (10^3 τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) 2

1.2: Συμβολή βιομάζας και αποβλήτων στην παραγωγή ενέργειας σε Ktoe..... 4

3.1: Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους 63

3.2: Τύπος και υδροδυναμικές παράμετροι του εδάφους (μέσες τιμές)..... 65

3.3: Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα 66

4.1: Συντελεστές εξατμισίμετρου για διαφορετικές θέσεις και κλιματικές συνθήκες 105

4.2: Τιμές δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης 118

4.3: Θεωρητικός υπολογισμός της δόσης, του εύρους και της διάρκειας άρδευσης 118

6.1: Πίνακας Ανάλυσης Παραλλακτικότητας Πολλαπλής Παλινδρόμησης 155

7.1: Ημέρα του έτους κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η σπορά και μετάβαση της καλλιέργειας από στάδιο σε στάδιο 181

7.2: Τυποποιημένοι και υπολογισμένοι φυτικοί συντελεστές για κάθε στάδιο ανάπτυξης και για κάθε μεταχείριση 182

7.3: Τιμές εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας όπως υπολογίστηκαν από την εξίσωση 7.1 για κάθε μεταχείριση και βλαστικό στάδιο ανάπτυξης την τριετία 2007-2009 183

7.4: Συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που χορηγήθηκε σε κάθε μεταχείριση και κάθε καλλιεργητική κάθε καλλιεργητική περίοδο 185

7.5: Αποδοτικότητα χρήσης νερού την τριετία 2007-2009 186

8.1: Διαφορές στην μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση 196

9.1: Διαφορές στην μεταβολή του ύψους κεντρικού στελέχους φυτού την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση 210

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.2:	Διαφορές στην απόδοση ξηρής βιομάζας των μεταχειρίσεων την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση	218
9.3:	Παραγωγή ενέργειας από ξηρή βιομάζα την τριετία 2007-2009	234
9.4:	Ενεργειακό ισοζύγιο των μεταχειρίσεων την τριετία 2007-2009	237
10.1:	Ακαθάριστη πρόσοδος κάθε μεταχείρισης για κάθε μια καλλιεργητική περίοδο και η μέση τιμή της	244
10.2:	Άμεσες δαπάνες για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	246
10.3:	Κόστος χρήσης νερού, εργατικών χεριών, κεφαλαίου για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	247
10.4:	Άμεσο κόστος παραγωγής για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	248
10.5:	Άμεσο κόστος νερού για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	250
10.6:	Ακαθάριστο κέρδος για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	251
10.7:	Άμεσες δαπάνες παραγωγής για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009	256

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σελίδα

3.1: Ο πειραματικός αγρός πριν τη χάραξη των πειραματικών τεμαχίων 62
3.2: Συσκευή Richards και οι δίσκοι πιέσεως 1Atm και 15Atm 64
3.3: Διάταξη πειραματικών τεμαχίων 69
3.4: Τοποθέτηση υπόγειου συστήματος άρδευσης με υπεδαφοθέτη 70
3.5: Γραφική απεικόνιση της διάταξης υπόγειας στάγδην άρδευσης 70
3.6: Γραφική απεικόνιση της διάταξης επιφανειακής στάγδην άρδευσης..... 71
3.7: Κεφαλή ελέγχου με το φίλτρο δίσκων, τη βαλβίδα εκτόνωσης, τις ηλεκτροβάνες τροφοδοσίας των μεταχειρίσεων και το κεντρικό υδρόμετρο 73
3.8: Διάταξη αισθητήρα Moisture Point (πάνω) και EnviroSMART επί της γραμμής σποράς 80
3.9: Ο αισθητήρας EnviroSMART και η κεφαλή ελέγχου με τα φίλτρα, την ηλεκτροβάνα και τον data logger 83
4.1: Επίδραση των κλιματικών παραμέτρων σε εξατμισίμετρο τύπου Α τοποθετημένου σε ακαλλιέργητο έδαφος και καλλιέργεια αναφοράς 100
4.2: Μετεωρολογικός σταθμός και εξατμισίμετρο τύπου Α 103
4.3: Διακύμανση φυτικού συντελεστή Kc καλλιέργειας σόργου κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου 109
5.1: Απεικόνιση των μετρημένων τιμών, των εκτιμηθέντων τιμών και των τιμών του σφάλματος 126
5.2: Τυπική απεικόνιση της t (Student) κατανομής 131
5.3: Όρια εμπιστοσύνης μιας τυπικής κανονικής t (Student) κατανομής ... 136
5.4: Διάφορες απεικονίσεις διαγραμμάτων υπολοίπων 140
5.5: Τεχνητή αύξηση της τιμής του R^2 χωρίς αντίστοιχη βελτίωση του μοντέλου 142
6.1: Τυπική απεικόνιση της t (Student) κατανομής 157

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

6.2:	Περιοχή οριοθέτησης ενός μοντέλου παλινδρόμησης με δύο μεταβλητές ...	163
6.3:	Απεικόνιση σημείου εκτός της περιοχής που οριοθετούν τα x	166
7.1:	Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2007-2009	178
7.2:	Διακύμανση των μέσων τιμών της εδαφικής υγρασίας την τριετία 2007-2009	188
7.3:	Εμβαδομέτρηση ρίζας σόργου	189
8.1α:	Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2007	197
8.1β:	Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2008	198
8.1γ:	Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2009	199
8.2:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων της μεταχείρισης E70	200
8.3α:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων A100, Y70 και E50	201
8.3β:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Y100, Y50 και E100	202
8.4α:	Ενδεικτική απεικόνιση εμβαδομέτρησης φυλλικής επιφάνειας φυτού της μεταχείρισης E100 σε περιβάλλον εργασίας AutoCAD για τα έτη 2007 (πάνω) και 2008 (κάτω)	204
8.4β:	Ενδεικτική απεικόνιση εμβαδομέτρησης φυλλικής επιφάνειας φυτού της μεταχείρισης E100 σε περιβάλλον εργασίας AutoCAD για το έτος 2009.....	205
8.5:	Μέσες τιμές LAI όπως μετρήθηκαν με τη συσκευή SunScan και την εμβαδομέτρηση με AutoCAD την τριετία 2007-2009	205
8.6:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας των μετρήσεων LAI με τη μέθοδο SunScan και τη εμβαδομέτρηση με AutoCAD	207
9.1α:	Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2007	211
9.1β:	Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2008	212
9.1γ:	Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2009	213

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.2:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων της μεταχείρισης Ε70	214
9.3α:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Α100, Υ70 και Ε50	215
9.3β:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ100, Υ50 και Ε100	216
9.3γ	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Ε100	217
9.4α:	Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2007	219
9.4β:	Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2008	220
9.4γ:	Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2009	221
9.5	Συμβολή των μερών του φυτού στην ξηρή βιομάζα	222
9.6:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Ε70 και Α100	223
9.7α:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ70, Ε50 και Υ100	224
9.7β:	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ50 και Ε100	225
9.8α:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε100	226
9.8β:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ100	227
9.8γ:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Α100	228
9.8δ:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε70	229
9.8ε:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ70	230
9.8στ:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ50	231
9.8ζ:	Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε50	232
9.9:	Απεικόνιση της διακύμανσης της παραγωγής ξηρής βιομάζας των 7 μεταχειρίσεων στον αγρό	233

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν έναν κρίσιμο φυσικό πόρο απαραίτητο για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει στην μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω των αυξημένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και αρωματικών υδρογονανθράκων αλλά και στην επιβάρυνση των οικονομιών των εξαρτημένων χωρών με τις συνεχείς αυξομειώσεις στην τιμή τους. Επομένως, η ανταγωνιστική, αξιόπιστη και αειφόρος παραγωγή ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την οικονομία. Επιπλέον, η απόκτηση τεχνογνωσίας στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές συμβάλει στην μείωση προβλημάτων όπως είναι οι διακοπές ρεύματος λόγω κακοτεχνιών στα διεθνή δίκτυα μεταφοράς ενέργειας ή πρώτων υλών για την παραγωγή ενέργειας (πετρελαίου, φυσικού αερίου, λιθάνθρακα) αλλά και την αθέτηση διακρατικών συμφωνιών (Eurostat, 2009).

Από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη για ανάληψη πρωτοβουλιών τόσο σε επίπεδο χώρας όσο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έτσι τον Ιανουάριο του 2007 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε την πρόταση COM 2007 σύμφωνα με την οποία η ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης πρέπει να έχει ως στόχο την:

- καταπολέμηση των παραγόντων που συμβάλουν στις κλιματικές αλλαγές και
- διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας και ανταγωνιστικότητας στους κόλπους της Ευρωπαϊκής Ενώσεως.

Παράλληλα επιδιώκεται η επίτευξη ευρύτερων στόχων όπως είναι η μείωση της ενεργειακής εξάρτισης από τον άνθρακα, η εξασφάλιση μεγαλύτερου αριθμού επιλογών για τους καταναλωτές ενέργειας και η πραγματοποίηση επενδύσεων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

στην κατασκευή νέων υποδομών. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, τον Μάρτιο του 2007, επικύρωσε τους παρακάτω στόχους:

- μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% (ως προς τους αντίστοιχους του 1990) έως το 2020,
- αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% έως το 2020,
- αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας κατά 20% έως το 2020 και
- αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων στις μεταφορές κατά 10% έως το 2020 (Eurostat, 2009).

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φαίνεται να αποτελεί ένα από τα κλειδιά για την επιτυχία της νέας ενεργειακής πολιτικής. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η μείωση της εξάρτισης από τα ορυκτά καύσιμα, η μείωση των εκπομπών άνθρακα και η μείωση του κόστους από τις τιμές των ορυκτών καυσίμων (Eurostat, 2009).

Η υπερκατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν παράγοντα που συμβάλει στην υπερκατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε μερικές από τις 27 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Πίνακας 1.1: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε Ktoe (10^3 τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) (Eurostat, 2009).

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Ευρωπαϊκή Ένωση (27)	1724,3	1762,9	1757,8	1803,0	1823,9	1825,6	1825,5	1806,3
Ευρωπαϊκή Ένωση (25)	1668,6	1706,6	1700,3	1743,3	1765,3	1766,4	1764,2	1745,9
Βέλγιο	61,5	60,3	58,4	61,6	61,5	61,1	60,4	57,4
Δανία	19,5	20,2	19,8	20,8	20,2	19,7	20,9	20,5
Ενιαία Γερμανία	342,4	353,3	345,6	348,3	350,3	347,1	348,8	339,6
Ελλάδα	28,2	29,1	29,9	30,3	30,8	31,4	31,5	33,5
Ισπανία	123,7	127,3	130,8	135,3	141,5	144,6	144,0	146,8
Γαλλία	259,5	267,2	267,3	271,9	276,1	277,1	273,8	270,3
Ιταλία	173,0	173,7	174,2	183,3	184,7	187,3	186,1	183,5
Κύπρος	2,4	2,4	2,4	2,7	2,5	2,5	2,6	2,7
Ολλανδία	77,0	79,1	79,7	81,9	83,8	82,5	80,5	84,5
Αυστρία	29,1	30,8	31,5	33,2	33,5	34,3	34,8	33,8
Πορτογαλία	25,1	25,2	26,3	25,7	26,4	27,0	25,3	26,0
Φιλανδία	32,5	33,2	35,2	37,2	37,5	34,7	37,8	37,6
Σουηδία	47,9	51,4	51,1	50,5	52,6	51,7	50,3	50,6
Ενωμένο Βασίλειο	231,9	232,7	226,8	231,2	232,5	232,8	229,1	221,1
Νορβηγία	26,1	27,0	24,3	27,3	28,3	32,3	25,0	27,7
Ελβετία	25,9	27,4	26,5	26,6	26,9	26,9	28,1	2,7

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Από τον πίνακα φαίνεται ότι η κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα είναι 30,6 Ktoe κατά μέσο όρο και αποτελεί το 1,7% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 χωρών μελών. Από τον ίδιο πίνακα φαίνεται ότι η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει ανοδική τάση στις περισσότερες χώρες ενώ λίγες είναι εκείνες στις οποίες διατηρείται σταθερή ή μειώνεται. Επομένως φαίνεται καθαρά η σημασία της χρήσης ανανεώσιμων πηγών για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών σε ενέργεια.

Μεταξύ των άλλων μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεγάλη σημασία παρουσιάζει η βιομάζα από καλλιεργούμενα φυτά λόγω των χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του θείου, αμμωνιακών και νιτρωδών ιόντων (El Bassam, 1998). Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που προέρχεται από ζώντες ή πρόσφατα αποθανόντες φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς (Biomass Energy Center, 2007). Σήμερα η βιομάζα καλύπτει το 15% της συνολικής ενέργειας ενώ σε ορισμένα ανεπτυγμένα κράτη το ποσοστό αυτό φτάνει και το 80% της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης (Hall et al., 1993, El Bassam et al., 1998). Συγκεκριμένα στην Βραζιλία η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα καλύπτει 90% των αναγκών της χώρας σε ενέργεια την περίοδο κατά την οποία οι υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής είναι εκτός λειτουργίας λόγω μειωμένης διαθεσιμότητας νερού. Η συνολική βιομάζα από την καλλιέργεια του ζαχαροκάλαμου δίνει ενέργεια ισοδύναμη με $280x10^6$ βαρέλια πετρελαίου ενώ παγκοσμίως η αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας ισοδυναμεί με $1050x10^6$ βαρέλια πετρελαίου υπό μορφή αιθανόλης. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές προκύπτουν από την επεξεργασία ολόκληρου του φυτού (φύλλα, στελέχη, σπόροι) αλλά και των υπολειμμάτων από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας (μπαγκάσε, baggage) (FAO, 2003). Στην Ευρώπη, χώρες όπως η Ιταλία, η Ολλανδία χρησιμοποιούν ζαχαρότευτλα για την παραγωγή αιθανόλης ενώ στη Γερμανία χρησιμοποιείται κυρίως η ελαιοκράμβη. Σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, αυτά που παράγονται από την καλλιέργεια φυτών διατηρούν το ισοζύγιο άνθρακα σε ισορροπία γιατί όση ποσότητα άνθρακα δεσμεύεται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, στη διάρκεια του βιολογικού κύκλου της καλλιέργειας, τόση περίπου εκπέμπεται κατά την καύση τους. Αντίθετα τα ορυκτά καύσιμα διαταράσσουν αυτή την ισορροπία διότι απελευθερώνουν, κατά την καύση τους άνθρακα που ήταν δεσμευμένος για εκατομμύρια χρόνια (Muschalek and Scharmer, 1992, Okken et al., 1992, Venturi et al., 1992, Moore, 1997, Dreier et al.,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

1998, Venturi and Venturi, 2003). Ωστόσο, ακόμα και σήμερα τα ορυκτά καύσιμα αποδεικνύονται αποδοτικότερα από τα αντίστοιχα βιοκαύσιμα, που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές, αφού για παράδειγμα για την ίδια δουλειά απαιτείται 2000 φορές περισσότερη ηλιακή ενέργεια σε σύγκριση με ένα οποιοδήποτε ορυκτό καύσιμο (Odum, 1984). Επομένως, τα ορυκτά καύσιμα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται υψηλής ποιότητας ενέργεια (παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων) ενώ τα βιοκαύσιμα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εκεί όπου απαιτείται χαμηλής ποιότητας εφαρμογές (παραγωγή θερμότητας) (Monti and Venturi, 2003).

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η βιομάζα συμβάλει σε πολύ μικρό ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας. Στον Πίνακα 1.2 φαίνεται η συμβολή της βιομάζας και των αποβλήτων σε ορισμένες από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στον πίνακα φαίνεται καθαρά ότι οι περισσότερες χώρες δεν χρησιμοποιούν τη βιομάζα για την παραγωγή ενέργειας. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι αποτελεί ένα πεδίο έρευνας και ανάπτυξης δίνοντας ταυτόχρονα διεξόδους σε προβλήματα αναδιάρθρωσης καλλιεργειών αλλά ταυτόχρονα οδηγεί και στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Πίνακας 1.2: Συμβολή βιομάζας και αποβλήτων στην παραγωγή ενέργειας σε Ktoe (Eurostat, 2009).

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Ευρωπαϊκή Ένωση (27)	63,1	63,4	65,6	72,6	77,7	81,9	87,9	96,2
Ευρωπαϊκή Ένωση (25)	59,8	60,7	62,6	69,0	73,8	77,9	83,9	92,1
Βέλγιο	0,7	0,8	0,7	1,0	1,0	1,1	1,3	1,2
Δανία	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,3	2,4	2,5
Ενιαία Γερμανία	6,8	7,3	7,9	10,0	11,4	13,0	15,8	22,1
Ελλάδα	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1
Ισπανία	4,0	4,1	4,3	4,7	4,9	5,1	5,1	5,4
Γαλλία	12,2	11,9	11,5	12,3	12,6	12,8	12,7	13,1
Ιταλία	1,6	1,7	1,6	2,0	3,1	3,4	3,8	3,7
Κύπρος	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ολλανδία	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	2,1	2,1	2,2
Αυστρία	3,0	3,3	3,4	3,7	3,8	3,9	4,2	4,4
Πορτογαλία	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,2
Φιλανδία	6,5	6,3	6,8	7,0	7,4	6,9	7,7	7,4
Σουηδία	8,2	7,7	7,7	8,1	8,3	8,9	9,4	9,8
Ενωμένο Βασίλειο	2,1	2,1	2,2	2,5	2,5	2,9	3,2	3,4
Νορβηγία	1,3	1,5	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3
Ελβετία	1,0	1,1	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8

Για την παραγωγή βιομάζας συστήνονται τα φυτά C_4. Σύμφωνα με τους Venturi and Venturi (2003) τα φυτά που μετατρέπουν αποδοτικότερα την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα, απαιτούν χαμηλές εισροές αγροεφοδίων και κατά την εποχή συγκομιδής έχουν χαμηλή περιεχόμενη υγρασία, είναι ιδανικά για την χρήση τους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

στην παραγωγή βιομάζας. Τέτοια φυτά είναι τα περισσότερα C_4 φυτά, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και το σόργο. Το σόργο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας με δύο τρόπους:

- Άμεσα με την καύση της παραγόμενης βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης και
- Έμμεσα με την παραγωγή αέριων ή υγρών καυσίμων και με την παραγωγή ζυμώσιμων υδρογονανθράκων και αιθανόλης (Gosse, 1996).

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα όμως του συγκεκριμένου φυτού είναι η ικανότητά του να παράγει ικανοποιητικές ποσότητες βιομάζας ακόμα και όταν επικρατούν συνθήκες έλλειψης νερού επιβραδύνοντας τις βιολογικές του λειτουργίες (Cosentino, 1996, Foti et al., 1996).

Το νερό αποτελεί έναν άλλο κρίσιμο φυσικό πόρο που είναι απαραίτητος για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, σήμερα οι υδατικοί πόροι καθίστανται ανεπαρκείς λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της επέκτασης των αρδευόμενων εκτάσεων, και της βιομηχανικής ανάπτυξης. Η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού (70% σε παγκόσμιο επίπεδο, πάνω από 80% στις περισσότερες Μεσογειακές χώρες και πάνω από 87% στην Ελλάδα). Οι αρδευόμενες εκτάσεις έχουν 6πλασιασθεί από το 1900 ενώ σήμερα το 40% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων προέρχεται από το 18% της αρδευόμενης γεωργίας. Η μείωση των βροχοπτώσεων, ως αποτέλεσμα των κλιματικών αλλαγών που υφίσταται ο πλανήτης μας, επηρεάζει τόσο τις περιοχές που εφαρμόζουν άρδευση για την παραγωγή αγροτικών προϊόντων όσο και τις περιοχές που παράγουν προϊόντα χωρίς την εφαρμογή αρδεύσεων. Άμεσο αποτέλεσμα των συνθηκών αυτών είναι να απειλείται η διαβίωση δισεκατομμυρίων ανθρώπων, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η ζήτηση νερού για άρδευση εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 14% μέχρι το 2025 και την ίδια περίοδο 8-15% του νερού θα περικοπεί από τη γεωργία για να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης και βιομηχανίας (Tsagarakis et al., 2001). Επομένως, καλλιέργειες που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ικανοποιητικά σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας πλεονεκτούν έναντι άλλων ευαίσθητων στην έλλειψη νερού καλλιεργειών.

Το σόργο είναι ένα φυτό το οποίο καλλιεργείται σε 99 χώρες σε όλο τον κόσμο και δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε άρδευση. Καλύπτει έκταση 44 εκατομμυρίων εκταρίων κυρίως σε φτωχές και ημιξηρικές περιοχές όπου το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καλαμπόκι δεν μπορεί να καλλιεργηθεί (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007a). Η καλλιέργεια έχει εγκλιματιστεί πολύ καλά στις συνθήκες της Νότιας Ευρώπης (Ελλάδος) σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί (Miller and Creelman, 1980, Dalianis, 1996, Chatziathanassiou et al., 1998, Alexopoulou et al., 2000, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2009α,β, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2008a,b, 2009a,b) ενώ σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη η παραγωγή του περιορίζεται από τις χαμηλές θερμοκρασίες (Petrini et al., 1993). Το σόργο, σε σύγκριση με άλλες καλλιέργειες, είναι πιο φιλική στο περιβάλλον κυρίως γιατί έχει χαμηλές απαιτήσεις σε αζωτούχο λίπανση (Mastrorilli et al., 1995, Curt et al., 1995).

Το σόργο, ως γραμμική καλλιέργεια, μπορεί να αρδευτεί με όλες σχεδόν τις μεθόδους άρδευσης. Πριν τη δεκαετία του 1950 η άρδευση γίνονταν με αυλάκια σε εδάφη που παρουσίαζαν κλίση έως 1%. Αντίθετα, σε περιοχές όπου δεν μπορούσε να εφαρμοστεί η άρδευση με αυλάκια εφαρμόζονταν άρδευση με καταιονισμό (Musick et al., 1988). Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού στην άρδευση με αυλάκια ήταν 59% σε εδάφη μετρίως υδατοπερατά ενώ στα εδάφη με μικρή υδατοπερατότητα η αποδοτικότητα χρήσης νερού έφτασε το 72%. Στην ίδια ερευνητική προσπάθεια, η μέση αποδοτικότητα χρήσης νερού για τη μέθοδο του καταιονισμού έφτασε το 83%.

Σταδιακά και μετά τη δεκαετία του 1950 η άρδευση του σόργου με αυλάκια εγκαταλείφτηκε ενώ ο καταιονισμός άρχισε να επικρατεί ως μέθοδος άρδευσης του σόργου (Musick et al., 1990). Οι κρουστικοί εκτοξευτήρες που χρησιμοποιούνταν αρχικά στον καταιονισμό άρχισαν και αυτοί να αντικαθίστανται με χαμηλής ενέργειας εκτοξευτήρες ακριβείας (LEPA low energy precision applicators), ένα σύστημα που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τους Lyle and Bordovsky (1981) με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού στον καταιονισμό στα επίπεδα του 95-98%. Οι Fipps and New (1990) μέτρησαν μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού όταν εφαρμόστηκε άρδευση με LEPA σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους καταιονισμού. Σε 123 συστήματα άρδευσης με περιστροφικό αρδευτή βρέθηκε ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού ήταν 85% (Musick et al., 1988) ενώ σε αρδεύσεις που πραγματοποιήθηκαν με σύστημα LEPA έφτασε το 96-99% (Lyle and Bordovsky, 1983, Schneider and Howell, 1990). Ο Buchleiter (1992) εφαρμόζοντας άρδευση με LEPA μέτρησε επιφανειακή απορροή που κυμαίνονταν μεταξύ 30 και 55% όταν οι κλίση του εδάφους μεταβάλλονταν από 3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σε 8%. Οι Spurgeon et al. (1995) συνέκριναν δύο παραλλαγές του συστήματος LEPA (καταιονισμός πάνω από την φυλλική επιφάνεια του φυτού και καταιονισμός ανάμεσα στη φυλλική επιφάνεια). Κατέληξαν σε ένα μοντέλο πρόβλεψης παραγωγής σύμφωνα με το οποίο η παραγωγή σόργου ήταν η ίδια και για τις δύο μεθόδους άρδευσης όταν οι κλίση του εδάφους ήταν μηδενική αλλά όταν η κλίση μεγάλωνε η μέθοδος άρδευσης με ψεκασμό του νερού ανάμεσα στα φυτά παρουσίασε μεγαλύτερη παραγωγή σε σύγκριση με τον καταιονισμό πάνω από την επιφάνεια των φύλλων.

Στη σύγχρονη γεωργική πρακτική η μεγιστοποίηση της παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας τείνει να εγκαταλειφτεί. Τη θέση της καταλαμβάνει η τάση μεγιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα νερού (Βύρλας, 2007). Επομένως, το ζητούμενο είναι να αναπτυχθούν συστήματα και μέθοδοι άρδευσης που να μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα χρήσης νερού. Δεδομένου ότι συστήματα άρδευσης όπως η κατάκλιση και ο καταιονισμός έχουν μειωμένη αποδοτικότητα χρήσης νερού θα πρέπει σταδιακά να αντικαθίστανται από συστήματα με μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού όπως είναι η επιφανειακή στάγδην άρδευση αλλά και η υπόγεια, η οποία αποτελεί παραλλαγή της. Εφαρμόζοντας τέτοιες μεθόδους άρδευσης αναμένεται σημαντική εξοικονόμηση νερού.

Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης είναι λιγότερες με τα σύγχρονα συστήματα καταιονισμού (Schneider and Howell, 1999). Οι Kincaid and Longley (1989) σε εργαστηριακή έρευνα βρήκαν ότι η ποσότητα σταγόνων νερού με διάμετρο 1,0 χιλιοστό όταν εκτοξεύονται σε περιβάλλον όπου επικρατεί θερμοκρασία 31^{o}C και σχετική υγρασία 22% δεν ξεπερνά το 1% της συνολικής μάζας νερού. Οι Solomon et al., (1985) έδειξαν ότι η διάμετρος των σταγόνων που εκτοξεύονται από οδοντωτούς δισκοειδής ψεκαστήρες υπερβαίνει το 1,0 χιλιοστό. Όταν ο χρόνος παραμονής τους στον αέρα είναι μικρότερος του 1,0 δευτερολέπτου τότε η εξάτμιση δεν είναι μεγαλύτερη από 2%. Οι Kohl et al., (1987) μέτρησαν απώλειες της τάξης του 0,5 έως 1,4% για λείους και 0,4-0,5% για τραχύς δισκοειδής ψεκαστήρες. Έρευνες μοντελοποίησης έδειξαν ότι οι συνολική εξάτμιση των σταγονιδίων ήταν 3% για σταθερό σύστημα καταιονισμού και 1% για μετακινούμενο αρδευτή (Thompson et al., 1993, 1997).

Μια άλλη μέθοδος άρδευσης, υψηλής αποδοτικότητας χρήσης νερού, που εφαρμόζεται στο σόργο είναι η στάγδην άρδευση (επιφανειακή και υπόγεια)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

(Colaizzi et al., 2004, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2009α, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2008a,b, 2009a,b). Αναφέρεται ότι η οικονομική απόδοση της καλλιέργειας υπό συνθήκες ελλειμματικής υπόγειας στάγδην άρδευσης είναι σημαντική (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2009β). Οι Παπανικολάου και Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη (2009ε) αναφέρουν ότι το ενεργειακό ισοζύγιο στην καλλιέργεια του σόργου είναι θετικό ακόμη και όταν η δόση άρδευσης ήταν ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής και εφαρμόστηκε με επιφανειακή στάγδην άρδευση.

Στην Ελλάδα εφαρμόζονται όλες σχεδόν οι μέθοδοι άρδευσης (κατάκλιση, καταιονισμός, στάγδην άρδευση). Από αυτές, η επιφανειακή στάγδην άρδευση είναι η δεύτερη πιο διαδεδομένη μέθοδος μετά τον καταιονισμό, αλλά όχι τόσο όσο επιβάλλουν οι κλιματολογικές συνθήκες της χώρας (μειωμένες βροχοπτώσεις και έλλειψη νερού). Σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία (2000), η στάγδην άρδευση καλύπτει το 22% της συνολικής αρδευόμενης έκτασης για γεωργική χρήση. Αντίθετα, η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζεται ελάχιστα μολονότι τα πλεονεκτήματά της έχουν αναδειχτεί και αποδειχτεί από πολλές ερευνητικές προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως στο εξωτερικό αλλά και στο εσωτερικό της χώρας και σε διάφορες καλλιέργειες (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2000, 2007α,β, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2001, 2002a,b).

1.2. ΣΚΟΠΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Κάθε ερευνητική προσπάθεια αποσκοπεί στην μελέτη συγκεκριμένων προβλημάτων και την αναζήτηση τρόπων επίλυσής τους. Στην γεωργική πρακτική τα προβλήματα που απασχολούν τους παραγωγούς είναι πολλά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα σημαντικότερα ίσως από αυτά είναι:

- η αναζήτηση διεξόδων στο θέμα της αναδιάρθρωσης καλλιεργειών,
- οι καλλιεργητικές πρακτικές που όταν εφαρμοστούν είναι δυνατό να μειώσουν το κόστος παραγωγής (γεωργία χαμηλών εισροών)
- η εξοικονόμηση νερού άρδευσης,
- η εφαρμογή νέων τεχνολογιών, οι οποίες διευκολύνουν την καλλιεργητική πρακτική ή/και συμβάλουν στην μείωση του κόστους παραγωγής.

Το θέμα της αναδιάρθρωσης των καλλιεργειών απασχολεί την Ελληνική αγροτική κοινωνία εδώ και πολλά χρόνια. Όταν τίθεται ως θέμα συζητήσεως

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

προκαλεί διχογνωμίες μεταξύ των ενδιαφερομένων. Τις περισσότερες φορές συνδέεται άμεσα με τις καταναλωτικές συνήθειες μικρότερων ή μεγαλύτερων περιοχών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την περιοχή της Θεσσαλίας αποτελεί η περίπτωση του βαμβακιού. Τα προηγούμενα χρόνια κατά την διάρκεια των οποίων ανθούσε η καλλιέργεια, η παραγωγή Ελληνικού βαμβακιού συνδέονταν με την παραγωγή Ελληνικών ενδυμάτων. Από τη στιγμή που άρχισαν να μετακομίζουν ή να κλείνουν οι βιοτεχνίες παραγωγής Ελληνικών ενδυμάτων μοιραία η καλλιέργεια άρχισε να φθίνει. Άλλο παράδειγμα είναι η πορεία της Ελληνικής καπνοβιομηχανίας η οποία ήταν συνδεδεμένη με την καπνοκαλλιέργεια και η οποία όταν άρχισε να φθίνει παρέσυρε μαζί της και την καπνοκαλλιέργεια με αποτέλεσμα να εξαφανιστεί.

Σταδιακά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια γίνονται προτάσεις για την εισαγωγή νέων καλλιεργειών στην γεωργική πρακτική της χώρας μας μέσα από τις ερευνητικές προσπάθειες των Πανεπιστημίων. Μερικές από τις προτάσεις που έχουν γίνει στους παραγωγούς είναι η καλλιέργεια αγριαγκινάρας σε περιοχές όπου δεν απαιτείται άρδευση, η καλλιέργεια της στέβιας σε περιοχές όπου καλλιεργούνταν ο καπνός. Στο πλαίσιο αυτό των προτάσεων για την ενασχόληση των γεωργών με νέες καλλιέργειες έγκειται και η πρόταση για καλλιέργεια του φυτού σόργου για την παραγωγή ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κάθε καλλιέργεια για να γίνει αποδεκτή από τους καλλιεργητές θα πρέπει να συνδέεται με κάποιας μορφής καταναλωτική συνήθεια. Στην περίπτωση του σόργου, η καταναλωτική συνήθεια που συνδέεται άμεσα με την καλλιέργειά του είναι η εξασφάλιση ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε πρώτο επίπεδο, επιδίωξη είναι η μείωση του οικονομικού κόστους θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα αλλά κυρίως η μείωση του περιβαλλοντικού κόστους από την ρύπανση του περιβάλλοντος που προκαλεί η χρήση των ορυκτών καυσίμων. Σε δεύτερο επίπεδο επιδιώκεται η εξασφάλιση ενός αξιοπρεπούς εισοδήματος για τους παραγωγούς, χωρίς να απαιτούνται νέες επενδύσεις σε εξοπλισμό, αλλά και η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας σε μονάδες επεξεργασίας της πρώτης ύλης (βιομάζα).

Η σύγχρονη συμβατική γεωργία χαρακτηρίζεται από μονοκαλλιέργειες καρποδοτικών και ινωδοτικών καλλιεργειών στις οποίες εφαρμόζονται μεγάλες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ποσότητες χημικών ουσιών (φυτοφάρμακα, λιπάσματα) (Franzluebbers and Francis, 1995). Η εφαρμογή της αμειψισποράς συμβάλει στην προστασία του περιβάλλοντος, την διατήρηση των αποδόσεων και τη μείωση της εξάρτησης από χημικά λιπάσματα (Heichel and Barnes, 1984, Youngberg and Buttel, 1984), την μείωση των προσβολών από έντομα και ασθένειες (Bird et al., 1990) και στην μείωση του αριθμού των ζιζανίων (Liebman and Janke, 1990). Αμειψισπορά δημητριακών με ψυχανθή μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις σε αζωτούχο λίπανση και παράλληλα να επιτευχθεί η βέλτιστη παραγωγή (Hanson et al., 1988). Οργάνωση και προγραμματισμός των αρδεύσεων με βάση την διαθέσιμη υγρασία εδάφους μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό τους (Kranz et al., 1992). Το σόργο είναι ένα φυτό το οποίο μπορεί να δώσει ικανοποιητικές αποδόσεις βιομάζας όταν καλλιεργείται υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007a). Υιοθετώντας τις παραπάνω προτάσεις στην καλλιέργεια του σόργου μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή βιομάζας και ταυτόχρονα να εξοικονομηθεί νερό άρδευσης.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η σύγχρονη κοινωνία, και ειδικότερα η αγροτική, είναι η έλλειψη νερού. Αναφέρονται χαρακτηριστικά παραδείγματα λανθασμένης εφαρμογής των αρδεύσεων από τους παραγωγούς στη βιβλιογραφία (Καραντούνιας και Δέρκας, 2000). Υπό αυτό το πρίσμα η πρόταση για την ενασχόληση με την καλλιέργεια του φυτού σόργου αποκτά ακόμη μεγαλύτερο ενδιαφέρον αφού είναι γνωστό στους επιστήμονες ότι αποτελεί ένα φυτό που παράγει ικανοποιητικά και σε συνθήκες έλλειψης νερού (για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται και ως φυτό καμήλα) (FAO, 2002). Επίσης έχει ήδη αναφερθεί ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μια μέθοδος που όταν σχεδιάζεται και εφαρμόζεται και διατηρείται κατάλληλα εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό άρδευσης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους και επομένως αποτελεί μια ακόμη πρόταση προς τους παραγωγούς στην προσπάθεια εξοικονόμησης νερού.

Η μέθοδος άρδευσης όμως δεν είναι αρκετή από μόνη της να συμβάλει σημαντικά στην εξοικονόμηση νερού. Συμπληρωματικά θα πρέπει να γίνεται ακριβής υπολογισμός των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών και με βάση αυτή γίνεται ο προγραμματισμός των αρδεύσεων. Μια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

από τις φιλικότερες και ακριβείς μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων είναι και η μέθοδος του εξατμισίμετρου τύπου Α. Σύμφωνα με αυτή καταγράφεται η ημερήσια εξάτμιση, όπως αυτή επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής, και με μια σειρά υπολογισμών καθορίζεται η δόση άρδευσης που θα εφαρμοστεί. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη τις εδαφικές συνθήκες και πώς οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους επηρεάζουν την κατανομή και την αποθήκευση του αρδευτικού νερού στο έδαφος. Για την καταγραφή των συνθηκών εδαφικής υγρασίας έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας. Ένας από τους οποίους είναι και ο Envirosmart της εταιρίας Sentek.

Οι αισθητήρες μέτρησης εδαφικής υγρασίας εκτός από την απλή καταγραφή έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν πλήρως την έναρξη και λήξη κάθε άρδευσης όταν συνοδεύονται από κατάλληλο εξοπλισμό. Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα χρησιμοποιήθηκε για να αξιολογηθεί τόσο η αξιοπιστία του αλλά και η πιθανότητα εξοικονόμησης νερού άρδευσης. Έτσι, στη μεταχείριση που αρδεύονταν με τον αισθητήρα η δόση άρδευσης καθορίζονταν τόσο από τις ιδιότητες του εδάφους και τον τρόπο που αυτές καθόριζαν την πτώση της υγρασίας κατά το χρόνο που μεσολαβούσε μεταξύ των αρδεύσεων όσο από τις κλιματικές συνθήκες που καθόριζαν την διαπνοή και επομένως την πρόσληψη νερού από το έδαφος. Σημειώνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία ελάχιστες είναι οι εργασίες που αναφέρονται στην χρήση του συγκεκριμένου αισθητήρα κυρίως για καταγραφικούς σκοπούς ενώ μέχρι και τη συγγραφή του κειμένου της εργασίας δεν βρέθηκαν εργασίες που να αναφέρονται σε έλεγχο άρδευσης με το συγκεκριμένο αισθητήρα στην Ελλάδα.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) είναι μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί ο βαθμός απορρόφησης θρεπτικών, ο βαθμός προσβολής από ασθένειες και η αποδοτικότητα της άρδευσης υπό τις συνθήκες της κάθε περιοχής (Kirk et al., 2009). Για τον υπολογισμό του έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ενώ έχουν κατασκευαστεί πλήθος οπτικών συσκευών μέτρησης LAI (Welles and Cohen, 1996, Jonckheere et al., 2004). Οι περισσότερες από τις οποίες εκτιμούν την πυκνότητα της φυτείας και την ανάγουν σε LAI. Εξέλιξη αυτών των μεθόδων αποτέλεσε η μέθοδος λήψης ψηφιακών φωτογραφιών. Αν και στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικά με την εκτίμηση του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

LAI, από φωτογραφίες που τραβήχτηκαν σε δάση και απεικόνιζαν την φυλλική επιφάνεια από κάτω προς τα πάνω, εντούτοις υπάρχουν ελάχιστες αναφορές για υπολογισμό του LAI από φωτογραφίες που τραβήχτηκαν πάνω από την φυλλική επιφάνεια (Kirk et al., 2009). Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να υπολογιστεί η τιμή του LAI με τη λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία τους μέσω του προγράμματος AutoCAD. Σημειώνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία μέχρι και τη συγγραφή του κειμένου της εργασίας δεν βρέθηκαν εργασίες που να αναφέρονται σε υπολογισμό του LAI με τη μέθοδο των ψηφιακών φωτογραφιών και επεξεργασία με το AutoCAD.

Για την λήψη σωστών αποφάσεων κατά την διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου οι παραγωγοί αλλά και οι επιστήμονες πρέπει να έχουν στη διάθεσή τους έναν οδηγό. Συνήθως, τη δυνατότητα αυτή τους την παρέχει η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων. Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων για τους επιστήμονες μπορεί να είναι μια διαδικασία με την οποία έρχονται σε επαφή σε τακτά χρονικά διαστήματα αλλά για τους παραγωγούς είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Για την διευκόλυνση των μελλοντικών καλλιεργητών σόργου έγινε μια προσπάθεια υπολογισμού ενός μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής βιομάζας χρησιμοποιώντας ορισμένες ανεξάρτητες μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν εύκολα να συλλεχθούν. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την μοντελοποίηση ήταν η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (Montgomery and Runger, 1999, 2003) ενώ οι κύριες παράμετροι οι οποίες υπεισέρχονται στην παρούσα έρευνα είναι οι ακόλουθες :

- Η παραγωγή του φυτού σόργου η οποία υπολογίζεται από την βιομάζα όσο και από την φυλλική επιφάνεια (εξαρτημένες μεταβλητές),
- Η άρδευση (ανεξάρτητη μεταβλητή),
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (ανεξάρτητη μεταβλητή),
- Η υγρασία του εδάφους και της ατμόσφαιρας (ανεξάρτητες μεταβλητές),
- Η ηλιοφάνεια (ανεξάρτητη μεταβλητή),
- Οι ώρες της ημέρας (ανεξάρτητη μεταβλητή),
- Η βροχόπτωση (ανεξάρτητη μεταβλητή), και

Από την επεξεργασία των παραπάνω στοιχείων προέκυψε μια συναρτησιακή σχέση, η οποία εκφράζει την παραγωγή ως συνάρτηση των σημαντικότερων από τις

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ανεξάρτητες παραμέτρους. Έτσι η μεν παραγωγή είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, οι δε υπόλοιπες παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Δημιουργείται έτσι μια εντόνως μη γραμμική συνάρτηση για την επίλυση της οποίας γίνεται γραμμικοποίηση με λογαριθμικοποίηση. Η προκύπτουσα συνάρτηση είναι πλέον γραμμική ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Στο γραμμικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και γίνεται εκτίμηση των συντελεστών του γραμμικοποιημένου πολυωνύμου, εκτίμηση των διαστημάτων εμπιστοσύνης για κάθε συντελεστή καθώς και τέστ ελέγχου για την καταλληλότητα της παλινδρόμησης. Επίσης θα γίνει γραφική απεικόνιση του μοντέλου σε τρισδιάστατα επίπεδα και σύγκριση μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών που θα προκύπτουν από το μοντέλο. Το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί αφενός για μελλοντικές προβλέψεις της παραγωγής σε παρόμοιες κλιματικές και καλλιεργητικές συνθήκες και αφετέρου είναι δυνατόν να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του, για την μεγιστοποίηση της παραγωγής του φυτού σόργου. Παρόλο που υπάρχουν εκτενείς αναφορές στην βιβλιογραφία σχετικά με την μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, εντούτοις δεν έχει γίνει μοντελοποίηση με την χρήση των παραπάνω ανεξάρτητων μεταβλητών.

Για την διερεύνηση των παραπάνω προβλημάτων πραγματοποιήθηκε ερευνητική εργασία τριετούς διάρκειας. Στον αγρό του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίνου, καλλιεργήθηκε σόργο το οποίο αρδεύτηκε με την μέθοδο της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης. Το σύστημα της επιφανειακής στάγδην άρδευσης εξοπλίστηκε με αυτοματισμούς ελέγχου των αρδεύσεων ενώ για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής.

Η εκπόνηση της παρούσας έρευνας έγινε για να αξιολογηθεί:

- η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών,
- η επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης με τις μεθόδους της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του φυτού σόργου,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- η μέθοδος επιφανειακής στάγδην άρδευσης με την χρήση αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους.

Ειδικότεροι στόχοι της εργασίας είναι:

- η επίδραση διαφορετικών δόσεων άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του ενεργειακού φυτού σόργου,
- η σύγκριση της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού στο σόργο,
- η σύγκριση της εφαρμογής τριών δόσεων άρδευσης με τη μέθοδο της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους οικονομικούς,
- η αξιολόγηση της μεθόδου υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία με το πρόγραμμα AutoCAD,
- η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής της καλλιέργειας με την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης.

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία που πραγματοποιήθηκε περιγράφεται και αναλύεται σε έντεκα κεφάλαια.

Στο 1^{ο} κεφάλαιο γίνεται μια γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζονται οι σκοποί, η δομή και η συμβολή της εργασίας στην έρευνα.

Στο 2^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιευμένων εργασιών που αναφέρονται στην επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση, σε αυτοματισμούς που έχουν κατά καιρούς εφαρμοστεί με τις δύο αυτές μεθόδους και στην καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού ινώδους σόργου.

Στο 3^{ο} κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός του πειραματικού κομματιού της έρευνας, ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος καθώς και οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής και των αρδευτικών δόσεων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στο 5ο κεφάλαιο περιγράφεται η θεωρεία της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Στο 6ο κεφάλαιο περιγράφεται η θεωρεία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Στο 7ο κεφάλαιο περιγράφονται τα κλιματικά δεδομένα, ο υπολογισμός των φυτικών συντελεστών, η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, η εξοικονόμηση νερού άρδευσης και η αποδοτικότητα χρήσης νεύρου.

Στο 8ο κεφάλαιο περιγράφεται μέθοδος υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τη λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία τους με το πρόγραμμα AutoCAD.

Στο 9ο κεφάλαιο περιγράφεται η επίδραση των διαφορετικών δόσεων άρδευσης, των διαφορετικών μεθόδων άρδευσης, των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των αρδευτικών δόσεων στην μεταβολή του ύψους του κεντρικού στελέχους και την παραγωγή βιομάζας του φυτού σόργου.

Στο 10ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια οικονομική μελέτη.

Στο 11ο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις επέκτασης της έρευνας.

Ακολουθεί ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται περίληψη στην αγγλική γλώσσα (Abstract).

1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ

Η κύρια συμβολή της εργασίας στην έρευνα είναι σημαντική διότι:

- Εφαρμόζεται για πρώτη φορά αυτόματη άρδευση με χρήση του αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους Envirosmart της εταιρείας Sentek στο ανοιχτό πεδίο.
- Εφαρμόζεται η μέθοδος υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τη λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία τους με το πρόγραμμα AutoCAD.
- Αποδεικνύεται η εξοικονόμηση νερού άρδευσης στην καλλιέργεια του σόργου με την εφαρμογή της μεθόδου άρδευσης που βασίζεται στη εδαφική υγρασία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- Αποδεικνύεται η εξοικονόμηση νερού άρδευσης στην καλλιέργεια του σόργου με την εφαρμογή της μεθόδου επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης.
- Εφαρμόζεται μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας από την καλλιέργεια του φυτού σόργου με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης όταν για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης χρησιμοποιείται εξατμισίμετρο τύπου Α.
- Εφαρμόζεται μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας από την καλλιέργεια του φυτού σόργου με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης όταν για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης χρησιμοποιείται η μέθοδος της εδαφικής υγρασίας.
- Εφαρμόζεται μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας από την καλλιέργεια του φυτού σόργου με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την άρδευση, την ηλιοφάνεια, την βροχόπτωση, την ατμοσφαιρική θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμοημέρες, την ατμοσφαιρική υγρασία εκφρασμένη σε σταθμισμένο παράγοντα $\frac{e_a - e_d}{e_d}$, την εδαφική υγρασία, τη διάρκεια ημέρας και τη μάζα του φυτού.
- Υπολογίζονται οι φυτικοί συντελεστές για το φυτό ινώδες σόργο.
- Υπολογίζονται οι φυτικοί συντελεστές για το φυτό σόργο από τις διαφορετικές δόσεις άρδευσης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου τύπου Α.
- Υπολογίζεται ο φυτικός συντελεστής για το φυτό σόργο από τη δόση άρδευσης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο της εδαφικής υγρασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο}

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η διερεύνηση των επιδράσεων της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη, παραγωγικότητα και οικονομικότητα του ενεργειακού φυτού σόργου προϋποθέτει τόσο την λεπτομερή μελέτη του φυτού σόργου όσο και τη μελέτη της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης. Για το σκοπό αυτό, διενεργήθηκε ανασκόπηση δημοσιευμένων εργασιών για την επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση καθώς και για την καλλιέργεια του φυτού σόργου. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε σε εκείνες τις δημοσιευμένες εργασίες που αναφέρονταν στην επίδραση της άρδευσης στα παραγωγικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

Οι εργασίες που έχουν δημοσιευτεί σχετικά με την στάγδην άρδευση ποικίλουν ως προς το περιεχόμενό τους. Αναφέρονται στην απόδοση διαφόρων καλλιεργειών, στις ιδιαιτερότητες από τη χρήση συστημάτων στάγδην άρδευσης και των μεθόδων προγραμματισμού τους, στις επιδράσεις εφαρμογής διαφορετικών δόσεων άρδευσης στα παραγωγικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών. Περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους, την ομοιομορφία άρδευσης αλλά και την διάρκεια ωφέλιμης ζωής των διαφόρων εξαρτημάτων που συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα στάγδην άρδευσης.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει εργασίες για την καλλιέργεια του φυτού σόργου, για την επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση. Έμφαση δόθηκε στην βιβλιογραφία από επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά εθνικών και διεθνών συνεδρίων όπου περιγράφονται τα αποτελέσματα επαναλαμβανόμενων ερευνών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ

Η στάγδην άρδευση, επιφανειακή ή υπόγεια, ανήκει στις μεθόδους της τοπικής ή μερικής άρδευσης. Έτσι χαρακτηρίζονται οι μέθοδοι εκείνες, που χορηγούν το νερό κατευθείαν στη ζώνη της μεγαλύτερης ριζικής δραστηριότητας των φυτών και μόνο εκεί, σε αντίθεση με τις διάφορες παραδοσιακές μεθόδους, που χορηγούν το νερό σε όλη (κατάκλιση, καταιονισμός) ή σχεδόν όλη (αυλάκια) την έκταση που καταλαμβάνει η καλλιέργεια. Ειδικά, στην υπόγεια στάγδην άρδευση οι αγωγοί εφαρμογής τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζοντας το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και τις λοιπές χημικές ουσίες απευθείας στο ενεργό ριζόστρωμα της καλλιέργειας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απευθείας εφαρμογή νερού και χημικών ουσιών στο ενεργό ριζόστρωμα της καλλιέργειας μεγιστοποιούν την παραγωγή και βελτιστοποιούν την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.

2.2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

Στα συστήματα στάγδην άρδευσης περιλαμβάνονται συστήματα επιφανειακής εφαρμογής του νερού με μορφή σταγόνας, υδρονέφωσης και συνεχούς δέσμης νερού και υπόγειας εφαρμογής με μορφή σταγόνας (Clyma, 2008). Μερικοί ερευνητές προτείνουν τον όρο μικροάρδευση (Howell, 2000). Σκοπός του συγκεκριμένου συστήματος άρδευσης είναι η εφαρμογή σε κάθε φυτό ή δέντρο της ποσότητας νερού που απαιτεί το έδαφος (Clyma, 2008). Η εφαρμογή του νερού δεν καλύπτει ολόκληρη την έκταση του αγρού και για το λόγο αυτό περιορίζεται η ανάπτυξη ζιζανίων και επομένως και οι απώλειες νερού από την εξατμισοδιαπνοή τους ενώ περιορίζεται και η εξάτμιση νερού από την επιφάνεια του εδάφους (Clyma, 2008).

Πιθανόν το πρώτο σύστημα υπόγειας άρδευσης να αποτέλεσε μια ευρεσιτεχνία του Charles Lee (1920). Ο Charles Lee κατασκεύασε ένα κεραμικό σωλήνα άρδευσης στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. το οποίο χρησιμοποιούνταν για στράγγιση και άρδευση κατά τη διάρκεια του έτους. Η ευρεσιτεχνία αυτή βραβεύτηκε από την κυβέρνηση των Η.Π.Α. (Keller and Karmeli, 1974, Camp et al., 1998, Clyma, 2008).

Τη δεκαετία 1940 η στάγδην άρδευση εφαρμόστηκε σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην Αγγλία. Ο Dr Symcha Blass εργάστηκε σε θερμοκήπια στην

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Αγγλία, μεταπολεμικά, ενώ την επόμενη δεκαετία μετέφερε τις γνώσεις του στο Ισραήλ όπου καλλιέργησε φυτά στην έρημο Negev χρησιμοποιώντας ακόμη και αλατούχο νερό (Clyma, 2008). Έκτοτε η στάγδην άρδευση εφαρμόστηκε σε Αυστραλία, Η.Π.Α., Νότια Αφρική κ.α. Στις Η.Π.Α. η στάγδην άρδευση εφαρμόστηκε σε δενδρώνες αβοκάντο (Clyma, 2008).

Τη διάρκεια της δεκαετίας του 60 η πρόοδος της έρευνας και της τεχνολογίας συνέβαλε στην χρήση νέων υλικών στην κατασκευή των αγωγών εφαρμογής. Οι αγωγοί εφαρμογής κατασκευάζονταν από πολυαιθυλένιο ή PVC ενώ οι οπές ή οι σχισμές δημιουργούνταν με διάτρηση ή κόψιμο του αγωγού (Busch and Kneebone, 1966, Hanson et al., 1970, Zetzsche and Newman, 1966). Ο Whitney (1970) αναφέρει ότι οι συνδέσεις των σταλακτήρων γινόταν με κάρφωμα σε διακριτά σημεία του σταλακτηφόρου. Οι Whitney and Lo (1969) αφού αξιολόγησαν διάφορους σταλακτήρες ως προς την απόδοσή τους και την πιθανότητα έμφραξης κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το πλαστικό εισηγμένο στόμιο έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 πραγματοποιήθηκε σειρά ερευνών ως προς την καταλληλότητα διαφόρων τύπων αγωγών και σταλακτήρων σε ποικιλία καλλιεργειών (Davis and Nelson, 1970a, Edwards et al., 1970, Hanson et al., 1970, Davis and Pugh, 1974, Gibson, 1974, Hanson and Patterson, 1974, Phene, 1974, Phene and Beale, 1976,1979, Phene and Sanders, 1976). Ειδικότερα για την υπόγεια στάγδην άρδευση, ο εξοπλισμός είχε αναπτυχθεί αρκετά (Zetzsche and Newman, 1966, Whitney, 1970). Την ίδια περίοδο στο Ισραήλ πραγματοποιούνταν ερευνητικές προσπάθειες γύρω από την εφαρμογή συστημάτων υδρολίπανσης στην επιφανειακή στάγδην άρδευση (Goldberg and Shmueli, 1970).

Την δεκαετία 1980, άρχισε να προχωρά με ταχύτερους ρυθμούς η έρευνα γύρω από την υπόγεια στάγδην άρδευση. Βασικότερο λόγο της στροφής των ερευνητών προς την κατεύθυνση αυτή αποτέλεσε η μείωση του κόστους του εξοπλισμού. Την περίοδο αυτή η ερευνητικές προσπάθειες στρέφονταν γύρω από το βάθος τοποθέτησης των αγωγών εφαρμογής, την εφαρμογή διαφόρων χημικών ουσιών, τις απαιτήσεις για φιλτράρισμα του νερού καθώς και συγκρίσεις της αποδοτικότητας της υπόγειας στάγδην άρδευσης με την αποδοτικότητα άλλων μεθόδων άρδευσης (Wendt et al., 1977, Sammis, 1980, Bucks et al., 1981, Mitchell, 1981, Chase, 1985a, Plaut et al., 1985).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Τέλος, οι Ayars et al., (1999) αναφέρουν ότι υπόγεια συστήματα στάγδην άρδευσης διατήρησαν την καλή λειτουργία τους για τουλάχιστον 10 συνεχή έτη εφαρμόζοντας το νερό άρδευσης με καλή ομοιομορφία. Σε περιπτώσεις επιφανειακής στάγδην άρδευσης αναφέρεται ότι σταλακτηφόροι αγωγοί χρησιμοποιούνται έως και 20 έτη διατηρώντας ικανοποιητική ομοιομορφία εφαρμογής του αρδευτικού νερού.

2.2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Όταν ένα σύστημα στάγδην άρδευσης σχεδιάζεται, εγκαθίσταται και συντηρείται κατάλληλα τότε παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Τα κυριότερα από αυτά συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Εφαρμόζεται σε όλους σχεδόν τους τύπους εδαφών,
- Αποτελεί κατάλληλη μέθοδο άρδευσης σε περιοχές, όπου το νερό που διατίθεται για την άρδευση είναι λιγοστό ή πολύ ακριβό. Το νερό εφαρμόζεται αποδοτικότερα επειδή η εξάτμιση και η απορροή μειώνεται ή εξαλείφεται, η βαθιά διήθηση μειώνεται και η ομοιομορφία άρδευσης βελτιώνεται (Ayars et al., 2001).
- Αυξάνει την παραγωγή. Οι παραγωγές βελτιώθηκαν και για το βαμβάκι και για την ντομάτα έναντι της άρδευσης με αυλάκια και οι απώλειες λόγω βαθειάς διήθησης μειώθηκαν ή σχεδόν μηδενίστηκαν (Ayars et al., 2001).
- Η εφαρμογή θρεπτικών ουσιών γίνεται αποδοτικότερα διότι οι δαπάνες λιπάσματος και οι απώλειες νιτρικών μπορούν να μειωθούν (Phene, 1987, Lamm et al., 1997a).
- Μειώνεται η αλατότητα στην περιοχή του ενεργού ριζοστρώματος (Al – Omran et al., 2004). Αναφέρεται ότι απαιτείται ικανοποιητική διήθηση ώστε να διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα η αλατότητα κοντά στους αγωγούς εφαρμογής, όπου η πυκνότητα της ρίζας είναι μεγάλη θεωρώντας ότι θα είναι αναγκαία η εφαρμογή άρδευσης με καταιονισμό σε περίπτωση λίγων βροχοπτώσεων (Hanson et al., 2004).
- Τα ζιζάνια ελέγχονται ευκολότερα, μιας και μειώνονται λόγω έλλειψης υγρασίας ή καταπολεμούνται όπου απαιτείται έγκαιρα με εφαρμογή ζιζανιοκτόνων, διότι το ψεκαστικό μηχάνημα μπορεί να κινηθεί οποιαδήποτε στιγμή απαιτηθεί στην επιφάνεια του εδάφους (Clyma, 2008).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- Μειώνεται η εμφάνιση ασθενειών που ευνοούνται από την υγρασία στην επιφάνεια του εδάφους και γενικότερα στο περιβάλλον του φυτού (Bell et al., 1998).
- Ελαχιστοποιείται η επιφανειακή απορροή κατά την εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης σε χλοοτάπητα (Zoldoske et al., 1995).
- Είναι δυνατό με κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος να παραμένουν στον αγρό αρκετά ξηρές λωρίδες γης, όπου μπορούν να κινούνται με ευκολία τα γεωργικά μηχανήματα, οποιαδήποτε στιγμή απαιτηθεί. Στην υπόγεια δε όλη η επιφάνεια του αγρού παραμένει ξηρή. Οι Zoldoske et al., (1998), θεωρούν ότι οι καλλιέργειες, όπως τα οινοποιήσιμα σταφύλια, που επιδέχονται μεγαλύτερη μηχανοποίηση, μπορούν να ωφεληθούν από την εφαρμογή του συστήματος της υπόγειας στάγδην άρδευσης.
- Το σύστημα υπόγειας άρδευσης είναι μια μέθοδος άρδευσης κατάλληλη για αυτοματοποίηση (Lamm et al., 1997c). Οι Shock et al., (1996), χρησιμοποίησαν αισθητήρες για την καταμέτρηση της υγρασίας του εδάφους προκειμένου να ελέγχουν την άρδευση σε καλλιέργεια κρεμμυδιών υπό συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης.
- Η υπόγεια στάγδην άρδευση αποτελεί κατάλληλη μέθοδο άρδευσης για χρήση υγρών αποβλήτων (Σακελλαρίου κ.α., 2003α, 2004, Sakellariou – Makrantonaki, M. et. al., 2005b,c,d).
- Περιορίζεται στο ελάχιστο ο πιθανός κίνδυνος από την επαφή με τα υγρά απόβλητα (Trooien et al., 1999).
- Ο Phene (1995), έχει αποδείξει ότι για μια δεδομένη ποσότητα νερού άρδευσης σε ένα εύφορο αργιλώδες έδαφος, ο σφαιρικός όγκος που διαβρέχεται με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης είναι κατά 46% μεγαλύτερος από τον ημισφαιρικό όγκο που διαβρέχεται με το σύστημα επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

2.2.3. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η μέθοδος στάγδην άρδευσης παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης (Lamm and Trooien, 2003),

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- Η εφαρμογή καταιονισμού μετά τη σπορά και μέχρι η καλλιέργεια να αποκτήσει ριζικό σύστημα ικανό να απορροφήσει το νερό που εφαρμόζεται με στάγδην άρδευση.

Ειδικότερα η υπόγεια στάγδην άρδευση μειονεκτεί στο γεγονός ότι τυχόν διαρροές είναι δύσκολο να διαπιστωθούν και να επισκευαστούν ενώ η παρουσία τρωκτικών είναι πιθανό να προκαλέσει ζημιές στους αγωγούς εφαρμογής.

2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

2.3.1. ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΙΣΑΠΟΧΗ ΑΓΩΓΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής της επιφανειακής στάγδην άρδευσης και το βάθος στο οποίο τοποθετούνται οι αγωγοί εφαρμογής στην υπόγεια στάγδην άρδευση καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και την ομοιομορφία της άρδευσης.

Τα βάθη τοποθέτησης των αγωγών εφαρμογής και η ισαποχή τους ποικίλουν. Σε περιοχές όπου η καλλιεργητική πρακτική επιβάλει να εφαρμόζεται άροση, το βάθος τοποθέτησης των αγωγών εφαρμογής ποικίλει από 0,20m έως 0,70m. Αντίθετα σε περιοχές όπου η άροση δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα (χλοοτάπητας, τριφύλλι, μηδική) το βάθος των αγωγών εφαρμογής μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0,10-0,40m (Batchelor and Soopramanien, 1995, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003α, Camp and Lamm, 2008). Οι Alam et al. (2000) αναφέρουν ότι η απόδοση μηδικής ήταν ελαφρώς μικρότερη όταν ο αγωγός εφαρμογής τοποθετήθηκε σε βάθος 1,5m έναντι βάθους 1,0m, ενώ όταν οι αγωγοί τοποθετήθηκαν σε βάθη 0,3m και 0,4m δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην παραγωγή. Η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής ποικίλει ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας που αρδεύεται. Μικρή ισαποχή εφαρμόζεται σε άρδευση χλοοτάπητα ενώ μεγάλη σε καλλιέργειες λαχανικών, οπωρώνες και αμπελώνες. Σε καλλιέργειες που σπέρνονται ομοιόμορφα η τοποθέτηση γίνεται στο μέσο κάθε δεύτερης ή τρίτης γραμμής. Το βάθος τοποθέτησης εξαρτάται από το βάθος άροσης για να αποφεύγονται καταστροφές των αγωγών εφαρμογής αλλά και από τον τύπο του εδάφους έτσι ώστε να εφαρμόζεται το νερό άρδευσης στο ριζόστρωμα χωρίς να διαβρέχεται η επιφάνεια του εδάφους. Γενικά, η τοποθέτηση γίνεται σε βάθος 0,1m στα χονδρόκοκκα εδάφη και σε βάθος 0,5m στα λεπτόκοκκα (Camp and Lamm, 2008).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Οι Kruse and Israeli (1987) μελέτησαν την ισαποχή αγωγών εφαρμογής στην υπόγεια στάγδην άρδευση και σε καλλιέργεια καλαμποκιού στην περιοχή του Colorado. Αναφέρουν ότι παρατηρήθηκε σημαντική παραλλακτικότητα ως προς την παραγωγικότητα των φυτών όσο αυξάνονταν η απόστασή τους από τον αγωγό εφαρμογής. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για καλή παραγωγή, οι αγωγοί εφαρμογής, πρέπει να τοποθετούνται στο μέσον της απόστασης που χωρίζει τις γραμμές σποράς. Σε άλλη έρευνα, οι Bozkurt et al., (2006) αναφέρουν ότι σε έρευνα που πραγματοποίησαν στα Άδανα της Τουρκίας, σε καλλιέργεια καλαμποκιού, η παραγωγή αυξήθηκε όταν η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής υπόγειας στάγδην άρδευσης ήταν 1,4m.

Αναφέρεται ότι αγωγοί εφαρμογής υπόγειας στάγδην άρδευσης τοποθετήθηκαν σε βάθη από 0,02m έως 0,70m ανάλογα με τις καλλιεργητικές πρακτικές της περιοχής, τον τύπο και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (Βύρλας, 2007). Σε διετή έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Kansas σε καλλιέργεια καλαμποκιού αναφέρεται ότι υψηλότερη παραγωγή, μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού και μικρότερη παραλλακτικότητα μεταξύ των ετών της έρευνας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις στις οποίες η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής ήταν 1,5m (Manges et al., 1995, Lamm et al., 1997b, Lamm and Trooien, 2003). Το βάθος στο οποίο τοποθετήθηκαν οι αγωγοί εφαρμογής ήταν 0,40-0,45m. Άλλοι ερευνητές αναφέρουν ότι δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην παραγωγή καλαμποκιού όταν οι αγωγοί εφαρμογής ισαπήχαν 0,75-3,0m και τοποθετήθηκαν κάθετα ως προς τις γραμμές σποράς (Spourgeon and Manges, 1990, Spourgeon and Makens, 1991).

Οι Shwankl et al., (1990) πραγματοποίησαν έρευνα σε αργιλοπηλώδες έδαφος στην Καλιφόρνια. Εξέτασαν τρία βάθη τοποθέτησης των αγωγών εφαρμογής , τρία βάθη σποράς και τρεις δόσεις άρδευσης. Παρατηρήθηκε ότι τοποθέτηση του αγωγού εφαρμογής σε βάθος 0,15 ή 0,23m, η σπορά σε βάθος 1,2 ή 3,8cm και η εφαρμογή δόσης άρδευσης μεγαλύτερης ή ίσης με 0,5 της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής μετά από διαβροχή της επιφάνειας του εδάφους, έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Οι Ayars et al., (1999), πραγματοποίησαν έρευνα στην Καλιφόρνια τη διετία 1991-1992. Η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής ήταν 2,04m και 1,04m. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η παραγωγή αλφαλφα το πρώτο έτος ήταν

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

17% μικρότερη στη μεταχείριση στην οποία η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής ήταν 2,04m ενώ το δεύτερο έτος η παραγωγή ήταν περίπου η ίδια και στις δύο μεταχειρίσεις. Στην ίδια έρευνα μελετήθηκε το βάθος εγκατάστασης των αγωγών εφαρμογής. Η αρχική εγκατάσταση έγινε σε βάθος 0,4m αλλά παρατηρήθηκε διαβροχή της επιφάνειας του εδάφους οπότε πραγματοποιήθηκε νέα εγκατάσταση σε βάθος 0,7m. Μετά την εγκατάσταση σε βάθος 0,7m δεν παρατηρήθηκε διαβροχή της επιφάνειας του εδάφους και επομένως το σύστημα μπορούσε να λειτουργεί και κατά την διάρκεια της συγκομιδής. Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι σε εδάφη αμμοαργιλοπηλώδη και αργιλοπηλώδη τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής σε βάθος 0,45m συνέβαλε στην τριχοειδή ανύψωση του νερού άρδευσης σε αρκετή απόσταση από το σταλάκτη. Σε καλλιέργεια φράουλας και σε ελαφρά εδάφη, είναι δυνατό να εφαρμοστεί υπόγεια στάγδην άρδευση όταν οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε βάθος μικρότερο από 0,1m (μη μόνιμη εγκατάσταση). Σε καλλιέργεια καλαμποκιού η τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής μπορεί να γίνει σε βάθος 0,3m όταν ο τύπος εδάφους είναι αργιλοπηλώδης έως αργιλώδης. Αύξηση της ισαποχής των αγωγών εφαρμογής πάνω από 2,1 ή 3m έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής και την αύξηση της βαθειάς διήθησης (Lamm et al., 1995b, 1997b, Darusman et al., 1997). Ωστόσο, είναι δυνατό να εφαρμοστεί με καλά αποτελέσματα σε περιοχές όπου παρατηρούνται μεγάλα ύψη βροχόπτωσης (Powell and Wright, 1993).

Οι Bhattarai et al. (2003) πραγματοποίησαν έρευνα σε καλλιέργεια βαμβακιού στην περιοχή Emerald. Παρατηρήθηκε ότι για βάθος τοποθέτησης του αγωγού εφαρμογής ίσο με 0,4m και εφαρμογή δόσης άρδευσης 0,75 της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής η παραγωγή αυξήθηκε ενώ το νερό άρδευσης εφαρμόστηκε αποδοτικότερα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Οι Khalilian et al. (2000) διαπίστωσαν σημαντικές διαφορές στην απόδοση βαμβακιού μελετώντας τρία βάθη τοποθέτησης (20,3, 30,5 και 40,6cm) και δύο ισαποχές (κάθε γραμμή σποράς και κάθε δεύτερη γραμμή σποράς). Οι Ayars et al (1995), αναφέρουν ότι σε καλλιέργειες τομάτας και βαμβακιού σε αναχώματα, η θέση του αγωγού εφαρμογής ως προς την γραμμή σποράς ή το ανάχωμα δεν επηρέασε την απόδοση. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν μηχανικές ζημιές στους αγωγούς εφαρμογής που ήταν τοποθετημένοι στο αυλάκι σε σύγκριση με αυτούς που ήταν τοποθετημένοι πάνω στο ανάχωμα. Οι Ayars et al. (1999) προτείνουν ότι για το βαμβάκι οι αγωγοί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εφαρμογής πρέπει να τοποθετούνται σε βάθος 0,4-0,5m ενώ σε εδάφη αργιλοπηλώδη έως αργιλώδη η τοποθέτηση μπορεί να γίνει και σε βάθος 0,3m.

Η επιλογή της ισαποχής και της παροχής των σταλακτήρων αποτελεί έναν άλλο παράγοντα που επηρεάζει την ομοιομορφία της στάγδην άρδευσης. Η επιλογή των σταλακτήρων πρέπει να γίνεται με γνώμονα το είδος της καλλιέργειας που πρόκειται να αρδευτεί, τη διαμόρφωση του ριζικού συστήματος, τον τύπο του εδάφους και το βάθος των αγωγών εφαρμογής. Είναι επιθυμητό οι σταλάκτες να ισαπέχουν τόσο ώστε να δημιουργείται ζώνη αλληλοεπικάλυψης νερού σε τέτοια απόσταση από τον αγωγό εφαρμογής που να καλύπτει τις περισσότερες γραμμικές καλλιέργειες. Σε οπωρώνες και αμπελώνες οι σταλάκτες τοποθετούνται κοντά στα φυτά και έχουν μεγαλύτερη ισαποχή έτσι ώστε να μην δημιουργούνται ζώνες αλληλοεπικάλυψης νερού (Camp and Lamm, 2008).

Πολλοί τύποι αγωγών εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υπόγεια στάγδην άρδευση. Οι περισσότεροι περιέχουν τους σταλακτήρες στο εσωτερικό τους. Ανεξάρτητα από τον τύπο των σταλακτήρων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, κατά την εκλογή και τοποθέτηση του αγωγού, το πάχος των τοιχωμάτων και η διάρκεια ωφέλιμης ζωής του. Εύκαμπτοι με λεπτά τοιχώματα αγωγοί τοποθετούνται συνήθως σε μικρότερα βάθη και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Αγωγοί με χονδρότερα τοιχώματα, εύκαμπτοι, έχουν τοποθετηθεί στο παρελθόν, με επιτυχία, σε βάθη τέτοια ώστε να μην υφίστανται μηχανικές ζημιές κατά τη διάρκεια της άροσης, των καλλιεργητικών εργασιών ή της συγκομιδής αλλά παράλληλα να αποφεύγονται παραμορφώσεις και καταστροφές από το βάρος των μηχανημάτων και του εδάφους. Άκαμπτοι αγωγοί με χοντρά τοιχώματα τοποθετούνται σε μεγαλύτερα βάθη χωρίς να παρουσιάζουν παραμορφώσεις και χρησιμοποιούνται για άρδευση πολυετών καλλιεργειών ή για άρδευση ετήσιων καλλιεργειών για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (πάνω από 10 έτη). Τέλος, ορισμένοι τύποι αγωγών εφαρμογής είναι εμποτισμένοι με βακτήρια ή άλλες χημικές ουσίες έτσι ώστε να προστατεύονται από την απόθεση λάσπης και άλλων υλικών τα οποία είναι δυνατό να προκαλέσουν έμφραξη των σταλακτήρων (Camp and Lamm, 2008).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2.3.2. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Τυπικά, με την στάγδην άρδευση διαβρέχεται μικρότερος όγκος εδάφους σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους άρδευσης. Το γεγονός αυτό είναι πιθανό να επηρεάζει την παραγωγή.

Έρευνα έδειξε ότι εύρος άρδευσης 1, 3, 5 ή 7 ημερών δεν επηρέασε την παραγωγή καλαμποκιού. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης αυξήθηκε όταν το εύρος άρδευσης ήταν μεγαλύτερο από 7 ημέρες λόγω αποθήκευσης μεγαλύτερης ποσότητας νερού που προέρχονταν από βροχόπτωση και μείωσης της βαθιάς διήθησης (Camp et al., 1989, Caldwell et al., 1994, Howell et al., 1995, 1997, Lamm and Trooien, 2008). Σε μη συμπιεσμένα εδάφη και για καλλιέργειες που αναπτύσσουν βαθύ ριζικό σύστημα, όπως το καλαμπόκι, δεν κρίνεται απαραίτητη η συχνή στάγδην άρδευση με δόσεις άρδευσης που φτάνουν το 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (Lamm and Trooien, 2008).

Οι Howell et al. (1997) αναφέρουν ότι εύρος άρδευσης μιας ημέρας ή μιας εβδομάδας δεν επηρεάζουν την παραγωγή είτε εφαρμόζεται επιφανειακή είτε υπόγεια στάγδην άρδευση σε αργιλοπηλώδη εδάφη του Texas. Οι Camp et al., (1989) αναφέρουν ότι η συχνότητα άρδευσης δεν επηρέασε την παραγωγή καλαμποκιού στις παράκτιες πεδιάδες του Ατλαντικού. Ο Camp (1998) αναφέρει ότι σε διάφορες έρευνες σχετικά με την επίδραση της συχνότητας άρδευσης στην απόδοση των καλλιεργειών τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε ορισμένους τύπους εδαφών παρατηρήθηκαν διαφορές ενώ σε άλλους όχι. Οι χορτοδοτικές καλλιέργειες σε χονδρόκοκκα αβαθή εδάφη ανταποκρίνονται θετικά στην συχνή άρδευση (Lamm and Trooien, 2008). Οι Plaut et al. (1988) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συχνή στάγδην άρδευση στο βαμβάκι προκαλεί περιορισμένη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος γιατί ο όγκος υγρού εδάφους περιορίζονταν σε βάθος 0,3-0,4cm. Αντίθετα, οι Phene and Beale (1976) και Phene et al. (1990) έδειξαν ότι το μήκος του ριζικού συστήματος καθώς και ο όγκος εδάφους που κάλυπτε το ριζικό σύστημα καλλιέργειας γλυκού καλαμποκιού μπορούσε να αυξηθεί εφαρμόζοντας υπόγεια στάγδην άρδευση.

2.3.3. ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Ο φυσικός πόρος που ονομάζεται νερό δεν είναι ανεξάντλητος. Οι προβλεπόμενες κλιματικές μεταβολές και ειδικότερα η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση των βροχοπτώσεων πρόκειται να εντείνουν το πρόβλημα της έλλειψης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

νερού. Επομένως, για την διατήρηση των αποθεμάτων νερού θα πρέπει, εκτός των άλλων μέτρων, να γίνει ορθολογική χρήση μέσα από τη λεπτομερή καταγραφή των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και τον προσεκτικό σχεδιασμό των αρδεύσεων (Howell et al., 1998). Οι δόσεις άρδευσης ποικίλουν και εκφράζονται ως αναλογίες μιας μετρημένης ή υπολογισμένης ποσότητας, η οποία είναι συνήθως η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή όπως αυτή μετράται με διάφορες μεθόδους (Penman-Monteith, εξατμισίμετρου τύπου Α, περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας κ.α.). Η εξάντληση των αποθεμάτων νερού και η αύξηση του κόστους οδηγεί στην μείωση των αρδευόμενων εκτάσεων την υιοθέτηση τεχνικών και τεχνολογιών άρδευσης μεγάλης αποδοτικότητας (ελλειμματική άρδευση, περιοδική εναλλαγή αρδευόμενων και μη αρδευόμενων εκτάσεων) (Unger and Wiese, 1979, Stewart et al., 1983)

Μια δόση άρδευσης καθορίζεται συνήθως με βάση την επιθυμητή παραγωγή αλλά και την αποδοτικότητα χρήσης νερού. Αποδοτικότητα χρήσης νερού είναι η αναλογία της παραγωγής δια την συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που χορηγήθηκε σε μια καλλιέργεια (Monteith, 1993). Έχει υπολογιστεί ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού στο καλαμπόκι είναι 0,048 Mg ha^{-1} για κάθε mm νερού που εφαρμόζεται επιπλέον των 325mm (Lamm et al., 1995a). Οι δόσεις άρδευσης που μελετήθηκαν στην ίδια έρευνα ήταν 25, 50, 75, 100 και 125% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις καθαρές απαιτήσεις σε νερό του καλαμποκιού έδειξαν ότι με προσεκτική εφαρμογή της στάγδην άρδευσης, ιδιαίτερα της υπόγειας, μειώθηκαν οι καθαρές ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό κατά 25%. Αυτή η μείωση της τάξης του 25% μεταφράζεται σε μείωση των καθαρών αναγκών της καλλιέργειας σε νερό που κυμαίνεται μεταξύ 35-55% όταν εφαρμόζεται καταιονισμός ή άρδευση με αυλάκια (Lamm and Trooien, 2008). Οι Bhattarai et al. (2003) εφάρμοσαν διαφορετικές δόσεις άρδευσης (50, 75, 90 και 120% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής) σε καλλιέργεια βαμβακιού, η οποία σπάρθηκε σε βαρύ αργιλώδες έδαφος και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση άρδευσης ίση με το 75% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής έδωσε μεγαλύτερη παραγωγή ενώ το νερό άρδευσης εφαρμόστηκε αποδοτικότερα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις.

Οι Curt et al. (1995) πραγματοποίησαν έρευνα εφαρμόζοντας τρεις διαφορετικές δόσεις άρδευσης σε γλυκό σόργο (33, 67 και 100% της ημερήσιας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εξατμισοδιαπνοής). Από την έρευνα προέκυψε ότι το γλυκό σόργο ανταποκρίνονταν θετικά στην αύξηση της δόσης άρδευσης ως προς την παραγωγή βιομάζας και την ανάπτυξη του φυτού ενώ η αποδοτικότητα άρδευσης δεν παρουσίασε διαφορές. Η περιεκτικότητα σε σάκχαρα δεν επηρεάστηκε από τη δόση άρδευσης. Οι Saeed and El-Nadi (1998) αναφέρουν ότι σε καλλιέργεια σανοδοτικού σόργου παρατηρήθηκε μείωση του ύψους, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και της ξηρής βιομάζας όταν το εύρος και η δόση άρδευσης αυξάνονταν. Οι Sakellariou-Makrantonaki et al. (2007a) αναφέρουν ότι η παραγωγή χλωρής βιομάζας του γλυκού σόργου δεν διέφερε όταν εφαρμόστηκε υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση ίση με το 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής και επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση ίση με το 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής. Οι Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., (2006β, 2007α) αναφέρουν ότι η παραγωγή βαμβακιού δεν διέφερε όταν εφαρμόστηκε υπόγεια στάγδην άρδευση με τις ίδιες δόσεις άρδευσης.

Στη Λουϊζιάνα των Η.Π.Α. πραγματοποιήθηκε έρευνα σε καλλιέργεια πιπεριάς όπου η δόση άρδευσης υπολογίστηκε με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου. Μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών δόσεων άρδευσης στην απόδοση της καλλιέργειας και από τα αποτελέσματα έγινε φανερό ότι η διαφορετική δόση άρδευσης δεν επηρέασε την παραγωγή (Bracy et al., 1995). Οι Sutton et al (1985) αναφέρουν καλύτερη απόδοση σε καλλιέργεια τομάτας όταν εφαρμόστηκε πλήρης άρδευση σε σύγκριση με την εφαρμογή ελλειμματικής δόσης άρδευσης, η οποία υπολογίστηκε με βάση το υδατικό δυναμικό του εδάφους. Οι Hanson and May (2004) διαπίστωσαν μείωση στην παραγωγή βιομηχανικής τομάτας όταν μειώθηκε η άρδευση από 90% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής σε 30% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής.

2.3.4. ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ

Η ποιότητα του νερού άρδευσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα τόσο για την επιλογή του συστήματος άρδευσης (καταιονισμός, στάγδην) αλλά και για τον καθορισμό των προδιαγραφών των αγωγών εφαρμογής και των σταλακτήρων. Γενικά, οι απαιτήσεις σε φιλτράρισμα του νερού άρδευσης μειώνονται όσο υψηλότερης καθαρότητας είναι το νερό (Camp and Lamm, 2008). Ωστόσο ελάχιστες πληροφορίες είναι διαθέσιμες για το καθαρό νερό (Carpa and Scicolone, 2007).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η έμφραξη των σταλακτήρων προκαλεί προβλήματα στην κατανομή του νερού άρδευσης μεταξύ των φυτών. Με άλλα λόγια μειώνεται η ομοιομορφία άρδευσης (Carpa and Scicolone, 1998, 2007). Στους κοινούς σταλακτήρες (παροχής 2-4Lh^{-1}), ο κίνδυνος εμφράξεων εμφανίζεται όταν το σύστημα λειτουργεί υπό πίεση 1 Atm. Η ποιότητα του νερού άρδευσης καθορίζεται από ορισμένες παραμέτρους, όπως είναι τα αιωρούμενα σωματίδια, τα διαλυμένα στερεά, το pH, ο ολικός σίδηρος, το μαγγάνιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το υδρόθειο και ο αριθμός βακτηρίων (Nakayama and Bucks, 1990, Carpa and Scicolone, 1998).

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την επίδραση της αλατότητας του εδάφους σε καλλιέργεια τομάτας, η οποία αρδεύεται με στάγδην άρδευση (Hanson and May, 2004). Οι Ayars et al (2001) αναφέρουν ότι τομάτα χειροσυλλογής έδωσε παραγωγή που κυμάνθηκε μεταξύ 111 και 145 Mg ha^{-1}, η οποία καλλιεργήθηκε σε έδαφος όπου η στάθμη του υπόγειου αλατούχου νερού ήταν ψηλά. Αντίστοιχα, η παραγωγή σε τομάτα μηχανοσυλλογής κυμάνθηκε μεταξύ 72 και 112 Mg ha^{-1}. Το βάθος του υπόγειου νερού ήταν 2m και η ηλεκτρική αγωγιμότητά του 5 dS m^{-1}. Οι Pasternak et al. (1986) αναφέρουν ότι όταν εφαρμόστηκε επιφανειακή στάγδην άρδευση με αλατούχο νερό, το οποίο είχε ηλεκτρική αγωγιμότητα 1,2, 4,5 και 7,5 dS m^{-1}, παρατηρήθηκε μείωση της παραγωγής από 10-60% όσο αυξάνονταν η αλατότητα του νερού. Γενικά, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε το αλατούχο νερό να ελέγχεται πριν την εφαρμογή του για άρδευση (Stewart, 2008).

Εργασίες στο πεδίο έδειξαν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια που περιλαμβάνονται στα μη επεξεργασμένα υγρά απόβλητα είναι ο κυριότερος παράγοντας που προκαλεί έμφραξη στους σταλακτήρες (Taylor et al., 1995, Scischa et al., 1996, Al-Nakshabandi et al., 1997, Papayannopoulou et al., 1998, Capra and Scicolone, 2004, 2005, Puig-Bargués et al., 2005) Ωστόσο, υπόγεια στάγδην άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας κατά 85% κάτω από το επίπεδο του σταλάκτη, ο οποίος ήταν τοποθετημένος σε βάθος 7,5cm (Jnad et al., 2000, 2001). Επεξεργασμένο νερό χρησιμοποιήθηκε σε συστήματα υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργειες καλαμποκιού, βαμβακιού σιταριού και μπιζελιού στο Ισραήλ (Oron et al., 1991).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής πραγματοποιείται έρευνα σχετικά με την εφαρμογή επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης σε ενεργειακές καλλιέργειες (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2006b, 2007b, 2009c), σε χλοοτάπητα και καλλωπιστικά κωνοφόρα, (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003α, 2004, 2005, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2003, 2004, 2005b,c,d). Η επί σειρά ετών ερευνητική δραστηριότητα έδειξε ότι δεν παρατηρούνται προβλήματα έμφραξης των σταλακτήρων ή ανομοιομορφία άρδευσης ενώ η εξοικονόμηση καθαρού νερού κυμαίνεται μεταξύ 23 και 38% χωρίς να επηρεάζεται η παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003α, 2004, 2005, 2006γ Sakellariou-Makrantonaki et al., 2003, 2004, 2005b,c,d, 2006b, 2007b, 2009c) .

2.3.5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έγχυση, απευθείας στο ενεργό ριζόστρωμα των καλλιεργειών, εκτός από το νερό και θρεπτικών στοιχείων καθώς και φυτοπροστατευτικών ουσιών υπό την προϋπόθεση ότι έχει προηγηθεί κατάλληλος σχεδιασμός και συντήρηση-διατήρηση του συστήματος. Η εφαρμογή νερού και θρεπτικών ουσιών μπορεί να γίνει με διαφορετική συχνότητα (καθημερινά ή εβδομαδιαία). Ορισμένες φυτοπροστατευτικές και καπνιστικές ουσίες είναι δυνατό να εφαρμοστούν μέσω ενός συστήματος στάγδην άρδευσης ενώ για την προστασία και εξασφάλιση καλής λειτουργίας των αγωγών εφαρμογής και των σταλακτήρων είναι δυνατό να εφαρμοστούν οξέα και χλωρίνη. Εφαρμόζοντας τέτοιου είδους καλλιεργητικές πρακτικές οι παραγωγοί εκτίθενται λιγότερο στα φυτοφάρμακα, το περιβάλλον προστατεύεται, το κόστος εφαρμογής μειώνεται και η αποδοτικότητα χρήσης αυξάνεται αφού η εφαρμογή πραγματοποιείται απευθείας στο στόχο (ριζόστρωμα ή παράσιτα ριζών). Επιπροσθέτως, η χρήση αυτοματισμών συμβάλει στην μείωση της έκπλυσης χημικών ουσιών στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους (Camp and Lamm, 2008).

Η στάγδην άρδευση χρησιμοποιείται κυρίως για την εφαρμογή θρεπτικών ουσιών. Ειδικότερα, η εφαρμογή λιπασμάτων με την υπόγεια στάγδην άρδευση πλεονεκτεί σε σύγκριση με την εφαρμογή τους με άλλες μεθόδους γιατί η εφαρμογή τους γίνεται απευθείας στο ριζόστρωμα και δεν χάνονται ποσότητες θρεπτικών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

λόγω απορρόφησής τους από ζιζάνια (Bar-Yosef, 1999). Έρευνα στο Κάνσας έδειξε ότι δεν υπήρχαν διαφορές στην παραγωγή καλαμποκιού όταν η αζωτούχος λίπανση εφαρμόστηκε επιφανειακά πριν την σπορά ή με την μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης. Επιπλέον, τα υπολείμματα της αζωτούχου λίπανσης στο έδαφος γύρω από το σταλάκτη οδήγησε στο συμπέρασμα ότι με χρήση λιγότερης ποσότητας αζώτου ήταν δυνατό να επιτευχτεί η ίδια παραγωγή καλαμποκιού (Lamm and Magnes, 1991). Αναφέρεται ότι σε καλλιέργεια μαρουλιού η απόδοση αυξήθηκε όταν ο φώσφορος εφαρμόστηκε μέσω του συστήματος άρδευσης σε σύγκριση με την εφαρμογή της ίδιας ποσότητας λιπάσματος με επιφανειακή διανομή (Chase 1985b) ενώ ο Mikkelsen (1989) διαπίστωσε ότι η αποδοτικότητα χρήσης φωσφόρου αυξήθηκε όταν αυτός εφαρμόστηκε με τη μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης.

2.3.6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος άρδευσης πρέπει να ξεκινά από τον καθορισμό της χρήσης και των στόχων που καλείται να εξυπηρετήσει το συγκεκριμένο σύστημα. Οι Δέρκας και Καραντούνιας το (2003) αναφέρουν ότι ένας από τους λόγους υπερκατανάλωσης νερού είναι η χρήση μεθόδων άρδευσης διαφορετικών από αυτές για τις οποίες σχεδιάστηκε το δίκτυο. Έπειτα θα πρέπει να γίνει μελέτη των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής στην οποία θα εγκατασταθεί το σύστημα (κλιματικά στοιχεία, ανάγλυφο, τύπος εδάφους), της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του νερού άρδευσης, των παραγωγικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας και της έκτασης του χωραφιού. Ο σχεδιαστής οφείλει να σχεδιάσει το σύστημα άντλησης, μεταφοράς και εφαρμογής του νερού άρδευσης κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ομοιομορφία άρδευσης με το ελάχιστο οικονομικό κόστος. Μέριμνα του σχεδιαστή είναι να χρησιμοποιήσει υλικά και μεθόδους που να είναι συμβατές με την καλλιεργητική πρακτική της περιοχής. Το τελικό σχέδιο θα πρέπει να υφίσταται θεωρητική αξιολόγηση της καταλληλότητας και σωστής λειτουργίας του πριν προταθεί για εφαρμογή στο πεδίο (Clark, 2008).

Για την επιτυχή προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος άρδευσης έχουν αναπτυχθεί πολλά προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή αλλά και μαθηματικά μοντέλα για το σχεδιασμό συστημάτων υπόγειας στάγδην άρδευσης. (Philip, 1968, Gilley and Allred, 1974a,b, Thomas et al., 1977, Warrick et al., 1980, Ben-Asher and Phene, 1993, Jorgensen and Norum, 1993). Οι Bristow et al. (2000)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

προσομοίωσαν την κατανομή του νερού και των χημικών επιβεβαιώνοντας την μικρή ανοδική κίνηση στα αμμώδη εδάφη.

Η στάγδην άρδευση και ειδικά η υπόγεια είναι δυνατό να λειτουργεί με διάφορους τρόπους είτε χειροκίνητα είτε μερικώς αυτοματοποιημένα είτε πλήρως αυτοματοποιημένα. Τα συστήματα υπόγειας στάγδην άρδευσης αυτοματοποιούνται πιο εύκολα από οποιοδήποτε άλλο σύστημα άρδευσης κυρίως γιατί ο έλεγχος γίνεται από ένα κεντρικό σημείο στο οποίο βρίσκονται συγκεντρωμένες συσκευές φιλτραρίσματος νερού, έγχυσης χημικών ουσιών, πνευματικές ή ηλεκτρικές βαλβίδες, απλοί προγραμματιστές άρδευσης ή συστήματα μικροεπεξεργαστών με δυνατότητα λήψης και αποστολής σημάτων για την έναρξη και τον τερματισμό των αρδεύσεων (Camp and Lamm, 2008).

Ο προγραμματισμός των αρδεύσεων αποτελεί ένα από τους κρίσιμους παράγοντες για τη σωστή λειτουργία κάθε συστήματος άρδευσης. Η ποσότητα και το εύρος άρδευσης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, το είδος της καλλιέργειας, και το σύστημα άρδευσης που θα εφαρμοστεί. Σε πολλές περιοχές η εγκατάσταση της καλλιέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη ικανοποιητικής παραγωγής ιδιαίτερα σε ξηρά ή ημιξηρικά κλίματα. Σε αυτές τις περιοχές, όπου η εδαφική υγρασία και οι βροχοπτώσεις δεν επαρκούν για το ικανοποιητικό φύτρωμα της καλλιέργειας, πρέπει να υπάρχει μέριμνα για την εφαρμογή επιφανειακής άρδευσης. Όταν εφαρμόζεται υπόγεια στάγδην άρδευση για φύτρωμα καλλιεργειών τότε η ποσότητα νερού που απαιτείται είναι μεγάλη και μπορεί να προκληθεί απώλεια νερού λόγω βαθιάς διήθησης οπότε αυξάνεται το κόστος. Επιφανειακή διαβροχή είναι δυνατό να παρατηρηθεί όταν η παροχή του σταλάκτη είναι μεγαλύτερη από την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους γύρο από αυτόν αλλά σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται ανομοιομορφία άρδευσης. Τέλος θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την έκπλυση των αλάτων που συσσωρεύονται πάνω από το σταλάκτη, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η βροχοπτώσεις δεν επαρκούν για την έκπλυσή τους σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους (Camp and Lamm, 2008).

Συνήθως ένα σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης θα πρέπει να έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 10 ετών, για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η χρήση του, όταν χρησιμοποιείται για άρδευση καλλιεργειών χαμηλής προσόδου. Επομένως θα πρέπει μα εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές έτσι ώστε να αποφεύγονται εμφράξεις των σταλακτήρων και καταστροφές των αγωγών εφαρμογής. Η

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

αντικατάσταση και ο έλεγχος για τυχόν φθορές είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί στα συστήματα υπόγειας στάγδην άρδευσης γιατί μεγάλο μέρος των εξαρτημάτων τους είναι θαμμένο στο έδαφος. Επομένως, οι λειτουργικές παράμετροι (παροχή, πίεση) ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να ελέγχονται συχνά και να αποτελούν δείκτες για την καλή λειτουργία του συστήματος. Η καλή λειτουργία επιτυγχάνεται με την συνεχή παρακολούθηση και διατήρηση της ποιότητας του νερού σε υψηλά επίπεδα, με το κατάλληλο φιλτράρισμα του νερού και με τον καθαρισμό των αγωγών εφαρμογής για την αποφυγή συσσώρευσης υλικών τα οποία μπορεί να προκαλέσουν εμφράξεις των σταλακτήρων. Περιοδική αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος άρδευσης σε σύγκριση με την θεωρητική κατά τον σχεδιασμό του συστήματος είναι δυνατό να αναδείξει τυχόν προβλήματα έγκαιρα, πριν αυτά να εξελιχτούν σε σοβαρά, επηρεάζοντας την ποσότητα και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων (Camp and Lamm, 2008).

2.3.7. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ

Η χωρική ομοιομορφία του νερού άρδευσης έχει σημαντική επίδραση στην μέση παραγωγή των καλλιεργειών. Κάθε μέθοδος άρδευσης χαρακτηρίζεται από διαφορετικό βαθμό ομοιομορφίας ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται το νερό άρδευσης στο έδαφος. Η ομοιομορφία άρδευσης εξαρτάται από το σύστημα άρδευσης, την τοπογραφία του αγρού, την ένταση του ανέμου (Wallach, 1990). Οι Ortega et al. (2002) κατέταξαν τα συστήματα άρδευσης ανάλογα με την ομοιομορφία ενστάλαξης του νερού (EU) και τον συντελεστή παραλλακτικότητας της παροχής (VC_q).

Η ομοιομορφία των συστημάτων υπόγειας στάγδην άρδευσης είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή των συστημάτων επιφανειακής στάγδην άρδευσης Camp et al. (1993). Όταν εφαρμόζεται άρδευση και λίπανση ταυτόχρονα θα πρέπει να αξιολογείται η ομοιομορφία ενστάλαξης καθώς και η αποδοτικότητα του συστήματος άρδευσης (Camp et al. 1997). Οι Ortega et al. (2002) υπολόγισαν την ομοιομορφία ενστάλαξης του νερού (EU), τον συντελεστή παραλλακτικότητας πίεσης (VC_p) και το συντελεστή παραλλακτικότητας παροχής και βρήκαν ότι οι τιμές τους ήταν 84,3%, 0,12 και 0,19 αντίστοιχα. Αντίθετα με την παραλλακτικότητα της πίεσης κατά μήκος του αγωγού εφαρμογής, η δομή του σταλακτήρα και η γεωμετρία του επηρεάζουν την ομοιομορφία παροχής του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σταλάκτη (Wu and Gitlin, 1979, Alizadeh, 2001, Kirnak et al., 2004). Οι διαφορές που πιθανόν να εμφανίζονται στη γεωμετρία του σταλάκτη οφείλονται σε μεταβολές στην πίεση και θερμοκρασία κατά τη διάρκεια κατασκευής αλλά και σε ετερογένεια του μίγματος υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους (Kirnak et al., 2004). Έχουν αναπτυχθεί πρότυπα σύμφωνα με τα οποία οι σταλακτήρες κατατάσσονται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή ενός συντελεστή, οποίος ονομάζεται συντελεστής κατασκευαστικής παραλλακτικότητας σταλακτήρα (CV_m) (ASAE, 2005). Όταν η τιμή του CV_m είναι μικρότερη του 10% τότε οι σταλακτήρες θεωρούνται κατάλληλοι ενώ όταν οι τιμή του CV_m είναι μεγαλύτερη του 20% θεωρούνται ακατάλληλοι (ASAE, 2005). Ο ρυθμός παραλλακτικότητας παροχής σταλάκτη (q_{var}) θεωρείται ένα κριτήριο για την καταλληλότητα του σχεδιασμού ενός συστήματος στάγδην άρδευσης και όταν q_{var}<10% ο σχεδιασμός θεωρείται αποδεκτός ενώ όταν q_{var}>20% ο σχεδιασμός θεωρείται μη αποδεκτός (Wu and Gitlin, 1979, Camp et al., 1997). Οι Phene et al. (1983) αναφέρουν ότι στην υπόγεια στάγδην άρδευση, η έμφραξη των σταλακτήρων και η μείωση της ομοιομορφίας κατανομής του νερού στο έδαφος προκαλείται από βακτήρια και διείσδυση ριζών στους σταλάκτες.

2.3.8. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ (WUE)

Η δόση άρδευσης, η ποσότητα νερού που εφαρμόζεται στο χωράφι και η ομοιομορφία άρδευσης καθορίζουν το κόστος άρδευσης, το σχεδιασμό της άρδευσης και κυρίως την παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) αποτελεί μια παράμετρο ευρύτατα χρησιμοποιούμενη για την περιγραφή της αποδοτικότητας άρδευσης με όρους παραγωγής (Howell, 2008).

Διάφοροι ορισμοί έχουν διατυπωθεί για την WUE. Ο Viets (1962) όρισε την WUE ως:

$$WUE = \frac{Y_g}{ET} \qquad (2.1)$$

όπου WUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (Kg m^{-3}), Y_g είναι η οικονομική παραγωγή (g m^{-2}) και ET είναι η χρήση νερού από την καλλιέργεια. Συνήθως η WUE εκφράζεται με όρους οικονομικής παραγωγής αλλά μπορεί να εκφραστεί και με όρους παραγωγής ξηρής βιομάζας. Ο Monteith (1993) όρισε την WUE ως:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$WUE = \frac{Y_g}{W_{total}} \quad (2.2)$$

όπου WUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (Kg m^{-3}), Y_g είναι η παραγωγή ξηρής βιομάζας (g m^{-2}) και W_{total} είναι η συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια (άρδευση, βροχόπτωση και συμβολή εδαφικής υγρασίας).

Οι δύο παραπάνω ορισμοί της WUE δεν περιγράφουν πλήρως την επίδραση της άρδευσης στην παραγωγή. Η WUE επηρεάζεται από την ποσότητα νερού που χρησιμοποίησε η καλλιέργεια (ET). Ο Bos (1979) εισήγαγε μια άλλη έκφραση για τον υπολογισμό της WUE, η οποία είναι:

$$WUE = \frac{(Y_{gi} - Y_{gd})}{(ET_i - ET_d)} \quad (2.4)$$

όπου WUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (Kg m^{-3}), Y_{gi} είναι η οικονομική παραγωγή (g m^{-2}) για επίπεδο άρδευσης i, Y_{gd} είναι παραγωγή (g m^{-2}) για επίπεδο μηδενικής άρδευσης, ET_i είναι η εξατμισοδιαπνοή (mm) για επίπεδο άρδευσης i και ET_d είναι η εξατμισοδιαπνοή (mm) για επίπεδο μηδενικής άρδευσης. Συχνά σε ξηρές και ημιξηρικές περιοχές, η τιμή του Y_{gd} είναι ίση με 0. Σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται η WUE της άρδευσης (IWUE). Η IWUE ορίζεται ως:

$$IWUE = \frac{(Y_{gi} - Y_{gd})}{IRR_i} \quad (2.5)$$

όπου IWUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης (Kg m^{-3}) και IRR_i είναι η ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε (mm) για επίπεδο άρδευσης i. Στην εξίσωση 2.5 η τιμή της Y_{gd} είναι μηδέν για άνυδρες περιοχές.

2.3.9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Μεγάλος αριθμός ερευνών έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με την αξιολόγηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των διαφόρων συστημάτων άρδευσης και την επίδραση που πιθανόν έχουν στην παραγωγικότητα διαφόρων καλλιεργειών (Colaizzi et al., 2006).

Το παλαιότερο σύστημα άρδευσης σε πολλές περιοχές των Η.Π.Α. ήταν τα αυλάκια. Αυτή η μέθοδος άρδευσης εφαρμόζονταν σε περιοχές με κλίση εδάφους μικρότερη από 1%. Οι Musick et al (1988) αναφέρει ότι οι πρώτες βελτιώσεις σε συστήματα άρδευσης με καταιονισμό πραγματοποιήθηκαν μετά τον 2ο Παγκόσμιο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πόλεμο γεγονός που οδήγησε στην εξάπλωσή του σε περιοχές όπου δεν ήταν δυνατό να εφαρμοστεί άρδευση με αυλάκια. Αργότερα το σύστημα αυτό αντικαταστάθηκε από συστήματα αυτόματου κεντρικού περιστροφικού αρδευτή κατά τις δεκαετίες 1960 και 1970, τα οποία εκσυγχρονίστηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 (Lyle and Bordovsky, 1983). Στα μισά της δεκαετίας του 1980 εφαρμόστηκε η επιφανειακή και η υπόγεια στάγδην άρδευση σε καλλιέργειες βαμβακιού (Henggeller, 1995) και σε καλλιέργεια καλαμποκιού στο Κάνσας (Lamm et al., 1995a, Lamm and Trooien, 2003). Τα συστήματα αυτόματου κεντρικού περιστροφικού αρδευτή που είναι εφοδιασμένα με νέου τύπου εκτοξευτήρες (χαμηλής πίεσης, μεγάλης ακρίβειας κ.α.) εφαρμόζουν το νερό με μεγάλη αποδοτικότητα παρόμοια αυτής που παρατηρείται στην υπόγεια στάγδην άρδευση (Schneider and Howell, 2000, Camp, 1998).

Ένα καλά σχεδιασμένο και διατηρημένο σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης περιορίζει τις απώλειες νερού που παρατηρούνται με τις υπόλοιπες μεθόδους. Επιπλέον, η εφαρμογή λιπασμάτων και άλλων χημικών ουσιών μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας το κόστος εφαρμογής (Lamm and Trooien, 2003). Η εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης συμβάλει στην αποδοτικότερη χρήση του νερού της βροχής σε σύγκριση με τις μεθόδους καταιονισμού (Jones and Clark, 1987). Σύμφωνα με τον Camp (1998) με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης οι παραγωγές ήταν οι ίδιες ή αυξήθηκαν σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους άρδευσης. Η υπόγεια στάγδην άρδευση δεν υιοθετήθηκε σε μεγάλο βαθμό από τους παραγωγούς στις Η.Π.Α. λόγω του μεγάλου κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας. Σε περιπτώσεις όπου οι βροχοπτώσεις δεν επαρκούν για το φύτρωμα των καλλιεργειών η εφαρμογή της υπόγειας στάγδην άρδευσης καθίσταται δυσχερής (Howell et al., 1997, Enciso et al., 2005). Οι O'Brien et al. (1998) αναφέρουν ότι το σύστημα στάγδην άρδευσης για να είναι οικονομικότερο, σε σύγκριση με τα συστήματα καταιονισμού, πρέπει να εφαρμόζεται για άρδευση μεγάλων εκτάσεων (>20ha) και η διάρκεια ζωής του φτάνει τα 15-20 έτη (συνεχής καλλιέργεια καλαμποκιού). Αντίθετα, οι Seggara et al., (1999) αναφέρουν ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση δεν αποδεικνύεται πάντα οικονομικότερη σε σύγκριση με τις μεθόδους καταιονισμού για καλλιέργεια βαμβακιού αν και δίνει μεγαλύτερη παραγωγή σε ίνα. Οι Enciso et al. (2005) αναφέρουν ότι το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα με τη μέθοδο της υπόγειας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

στάγδην άρδευσης εξαρτάται από την ισαποχή των σταλακτήρων (τοποθέτηση σε κάθε δεύτερη γραμμή σποράς ή τοποθέτηση σε κάθε γραμμή σποράς), το βάθος τοποθέτησης και την φυτρωτική ικανότητα των σπόρων κάθε είδους καλλιέργειας.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την επίδραση των διαφόρων μεθόδων άρδευσης στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Σε καλλιέργεια σόγιας και ηλίανθου με την εφαρμογή διαφορετικών δόσεων άρδευσης με τη μέθοδο του καταιονισμού και της υπόγειας στάγδην άρδευση διαπιστώθηκε ότι σε μικρότερες δόσεις άρδευσης υπερτερούσε η υπόγεια στάγδην άρδευση ενώ στις μεγαλύτερες δόσεις υπερτερούσε ο καταιονισμός (Colaizzi et al., 2006). Σε περιπτώσεις εφαρμογής μειωμένων δόσεων άρδευσης με την μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης προάγεται η διαπνοή και ελαχιστοποιείται η εξάτμιση με αποτέλεσμα τα φυτά να υφίστανται μικρότερη καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού. Αντίθετα, η εφαρμογή μεγαλύτερων δόσεων άρδευσης, με την μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης, οδηγεί σε μειωμένη απόδοση λόγω έλλειψης αερισμού στο βάθος του ριζοστρώματος από την περίσσεια νερού και θρεπτικών (Lamm et al., 1995a, Colaizzi et al., 2004). Σε καλλιέργεια καλαμποκιού βρέθηκε ότι η παραγωγή επηρεάζεται περισσότερο από τη δόση άρδευσης και λιγότερο από τη μέθοδο (Howell et al., 1997, Schneider and Howell, 1998). Σε καλλιέργεια βαμβακιού η μέση παραγωγή ίνας ήταν μεγαλύτερη όταν εφαρμόστηκε η μέθοδος της υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με τον καταιονισμό (Seggara et al., 1999).

Οι Bordovsky and Porter (2003) ερεύνησαν την επίδραση της προσπαρτικής άρδευσης και της διαφορετικής χωρητικότητας νερού του εδάφους. Οι μέθοδοι άρδευσης που εφάρμοσαν ήταν υπόγεια στάγδην άρδευση και δυο παραλλαγές του καταιονισμού. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παραγωγή σε ίνα βαμβακιού ήταν συγκριτικά μεγαλύτερη στην υπόγεια στάγδην άρδευση ενώ διαφορές υπήρχαν και μεταξύ των δύο παραλλαγών του καταιονισμού. Οι Colaizzi et al. (2004) σε έρευνα που πραγματοποίησαν σχετικά με την επίδραση ελλειμματικής άρδευσης (0, 25, 50, 75 και 100% των απαιτήσεων της καλλιέργειας σε νερό) διαπίστωσαν ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση έδωσε σημαντικά μεγαλύτερη παραγωγή σε σύγκριση με τον καταιονισμό και όταν εφαρμόστηκαν δόσεις άρδευσης 25, 50 και 75% της απαιτούμενης δόσης. Όταν η άρδευση ήταν πλήρης (100% των αναγκών της καλλιέργειας) οι διάφορες παραλλαγές του καταιονισμού υπερείχαν έναντι της υπόγειας στάγδην άρδευσης. Η ποιότητα της ίνας επηρεάστηκε ανάλογα με την

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ποσότητα. Από την ίδια έρευνα προέκυψε ότι η ωρίμανση του βαμβακιού δεν επηρεάστηκε από τη μέθοδο άρδευσης αλλά από την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε.

Η υπόγεια στάγδην άρδευση πλεονεκτεί έναντι των άλλων μεθόδων άρδευσης. Οι Sakellariou - Makrantonaki et al., (2001), αναφέρουν υπεροχή της υπόγειας στάγδην άρδευσης, ως προς την παραγωγή βιομάζας από την καλλιέργεια σόργου, έναντι της επιφανειακής. Οι Sakellariou - Makrantonaki et al., (2002a), αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού, η συνολική καθώς και η ξηρή βιομάζα ινώδους σόργου αυξήθηκε με την εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης έναντι του καταιονισμού διότι περιορίστηκαν οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και βελτιώθηκε η κατανομή του νερού στο ριζικό σύστημα της καλλιέργειας. Οι Sakellariou - Makrantonaki et al., (2002b), αναφέρουν αύξηση της υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων και αύξηση του βάρους ριζών και του ζαχαρικού τίτλου κάτω από συνθήκες υπόγειας άρδευσης σε σύγκριση με τον καταιονισμό. Σαφή υπεροχή της υπόγειας στάγδην άρδευσης έναντι της επιφανειακής, με μεγαλύτερους ρυθμούς αύξησης, με σημαντικά μεγαλύτερη τελική απόδοση ξηρής βιομάζας και παράλληλη εξοικονόμηση αρδευτικού νερού, ήταν το αποτέλεσμα πειραματικής μελέτης σε καλλιέργεια σόργου (Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.ά., 2003β).

2.3.10. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Η άρδευση συμβάλει σημαντικά στην οικονομική αξία των καλλιεργειών. Στην Αμερική το 1997 οι αρδευόμενες εκτάσεις παρήγαγαν το 49% των προϊόντων που πωλήθηκαν ενώ η αντίστοιχη έκταση που καλλιεργήθηκε ήταν 16% της συνολικής έκτασης από την οποία συλλέχθηκαν προϊόντα (Gollehon, 2008).

Οι Maisiri et al. (2005) πραγματοποίησαν έρευνα, στην οποία εκτός των άλλων, μελέτησαν την οικονομικότητα της χρήσης στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ελαιοκράμβης. Διαπίστωσαν ότι η χρήση στάγδην άρδευσης με ταυτόχρονη εφαρμογή υδατοδιαλυτών λιπασμάτων έδωσε το μεγαλύτερο ακαθάριστο κέρδος για τον παραγωγό σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους άρδευσης στην περιοχή. Επιπροσθέτως, δοκίμασαν τρεις διαφορετικούς τύπους λιπασμάτων, χοντρόκοκκα, λεπτόκοκκα και υγρά. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι τα χοντρόκοκκα λιπάσματα σε συνδυασμό με την στάγδην

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

άρδευση έδωσαν τις μεγαλύτερες επιστροφές χρημάτων στον παραγωγό ως προς το συνολικό μεταβλητό κόστος γιατί τα υγρά και λεπτόκοκκα λιπάσματα ήταν ακριβότερα αλλά δεν επηρέασαν την παραγωγή.

Οι Cetin et al. (2004) πραγματοποίησαν έρευνα σε ελαιώνα ως προς την οικονομικότητα της στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με τον καταιονισμό και την άρδευση με αυλάκια. Από την έρευνα αυτή προέκυψε ότι η οικονομική απόσβεση του συστήματος στάγδην άρδευσης πραγματοποιήθηκε την τέταρτη καλλιεργητική περίοδο μετά την αρχική εγκατάσταση. Επιπροσθέτως, αν και το αρχικό κόστος εγκατάστασης ήταν υψηλό η εφαρμογή στάγδην άρδευσης, σε καλλιέργεια ελιάς, ήταν επικερδής κυρίως λόγω της αυξημένης παραγωγής αλλά και της βελτιωμένης ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος. Οι Bucks and Nakayama (1982) αναφέρουν ότι σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη νερού και έντονο ανάγλυφο, το αυξημένο κόστος εγκατάστασης της στάγδην άρδευσης αντισταθμίζεται από την μείωση του κόστους άντλησης και του κόστους χρήσης νερού. Αντίθετα, όπου η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι καλή και το βάθος άντλησης μικρό το κόστος εφαρμογής στάγδην άρδευσης αντισταθμίζεται από την χρήση μικρότερων αντλητικών συγκροτημάτων, τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και την αύξηση της παραγωγής.

Οι Davis (1975) και Shoji (1977) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο μειώνεται η ποσότητα του νερού που αντλείται (λόγω μεγαλύτερης αποδοτικότητας άρδευσης) τόσο εξοικονομείται ενέργεια και μειώνεται το κόστος χρήσης της στάγδην άρδευσης. Οι Srivastava and Ahmed (1998) σχεδίασαν ένα σύστημα καναλιών υπό πίεση και διαπίστωσαν ότι εξοικονομήθηκε νερό άρδευσης. Οι Srivastava και Upadhayay (1998) αναφέρουν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομικότητα της στάγδην άρδευσης ήταν η αναλογία κέρδους παραγωγής (λόγος της παραγωγής που επιτυγχάνεται με την στάγδην άρδευση και την επιφανειακή ή άλλη μέθοδο άρδευσης), οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, οι απαιτήσεις σε άρδευση και το βάθος του υπόγειου νερού. Οι Srivastava et al.(2003) δημιούργησαν ένα λογισμικό για την αξιολόγηση του κόστους επένδυσης σε ένα σύστημα στάγδην άρδευσης. Η απόφαση που λαμβάνεται εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι η τοποθέτηση του συστήματος στάγδην άρδευσης, η επιλογή της καλλιέργειας, ο ρυθμός με τον οποίο αναπτύσσεται και η δυνατότητα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

αυτοματοποίησης του συστήματος έτσι ώστε να λειτουργεί σε ώρες μη αιχμής με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Τέλος, οι Lansford and Segarra (2004) μελέτησαν την οικονομικότητα της υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με συστήματα ψεκασμού και LEPA (Low-Pressure Precision Applicators) σε καλλιέργεια βαμβακιού. Από την έρευνα προέκυψε ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση είναι οικονομικά αποδοτικότερη σε σχέση με το σύστημα LEPA ενώ εξαρτάται από τον αγρό και επομένως θα πρέπει κάθε περίπτωση εγκατάστασης υπόγειας στάγδην άρδευσης να εξετάζεται χωριστά. Η μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα της υπόγεια στάγδην άρδευσης οφείλονταν στην αύξηση της παραγωγής σε ίνα αλλά και την βελτίωση της ποιότητας της ίνας.

2.4. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ

Πολλές φορές είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται μετρήσεις των φυσικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου χωρίς να είναι εφικτή ή επιθυμητή η φυσική επαφή μαζί του. Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου υπολογίζονται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος που αντανακλάται ή εκπέμπεται από το αντικείμενο. Τέτοιου είδους μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω δορυφόρων, αεροσκαφών και αισθητήρων εδάφους (Maas, 2008).

Για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων χρησιμοποιούνται δύο κυρίως χαρακτηριστικά. Το πρώτο χαρακτηριστικό που μετράται είναι η καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας και το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η μέτρηση της παραλλακτικότητας της καταπόνησης των φυτών από την έλλειψη νερού σε όλη την έκταση του αγρού. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει καταγραφή της καταπόνησης από την έλλειψη νερού των καλλιεργειών με την μέτρηση ιδιοτήτων του εδάφους όπου αναπτύσσεται η καλλιέργεια. Τέτοιες εδαφικές ιδιότητες είναι η περιεχόμενη εδαφική υγρασία και το υδατικό δυναμικό του εδάφους (Maas, 2008).

2.4.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας προκύπτει από την διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας που λαμβάνεται από το περιβάλλον και αυτής που χάνεται προς το περιβάλλον (Campbell and Norman, 1998). Κατά τη διάρκεια της ημέρας το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ενεργειακό ισοζύγιο της φυλλικής επιφάνειας δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{ab}+C=E+R_{em} \quad (2.6)$$

όπου R_{ab} είναι η μεγάλου και μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τα φύλλα και προέρχεται απευθείας από τον ήλιο, από τις αντανακλάσεις στα σύννεφα του ουρανού και την αντανάκλαση από το έδαφος και τη φυλλική επιφάνεια, C είναι η θερμοκρασία που λαμβάνεται ή χάνεται από την ατμόσφαιρα με τα διάφορα ρεύματα, E είναι η λανθάνουσα θερμότητα που χάνεται από την φυλλική επιφάνεια λόγω διαπνοής και R_{em} είναι η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από την φυλλική επιφάνεια. Η R_{em} δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{em} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.7)$$

όπου ε είναι η ανακλαστικότητα της επιφάνειας (ε=1 για τα φύλλα), σ είναι η σταθερά Stefan – Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας (^oK).

Στον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου η τιμή του E καθορίζεται από τις περιβάλλουσες συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα ανέμου) καθώς και από το άνοιγμα των στομάτων των φύλλων. Όταν οι συνθήκες ευνοούν την διαπνοή τα στόματα περιορίζουν το άνοιγμά τους έτσι ώστε να ελαττωθεί η απώλεια νερού από το φυτό με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή του E. Από την εξίσωση 2.6 προκύπτει ότι μείωση της τιμής του E συνεπάγεται αύξηση της τιμής του R_{em} για να διατηρηθεί η ισορροπία. Αυτή η αύξηση μετράται ως αύξηση της θερμοκρασίας της φυλλικής επιφάνειας (Campbell and Norman, 1998).

2.4.2. ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΖΥΜΩΝ

Στους περισσότερους οργανισμούς, οι βιοχημικές αντιδράσεις που καθορίζουν την ανάπτυξη ελέγχονται από ένζυμα. Η θερμοκρασία επηρεάζει τη λειτουργία των ενζύμων και επομένως και την ανάπτυξη των φυτών. Για το λόγο αυτό έχει προσδιοριστεί ένα εύρος θερμοκρασίας στο οποίο οι λειτουργία των ενζύμων είναι μέγιστη για ένα πλήθος καλλιεργειών (Burke et al., 1988). Το εύρος αυτό καλείται εύρος θερμοκρασιακής δραστηριοποίησης (Thermal Kinetic Window, TKW). Κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων χρονικών σημείων της ημέρας, σε άνυδρες και ημιξηρικές περιοχές, η θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας υπερβαίνει αυτό το εύρος και ειδικά όταν η εδαφική υγρασία ελαττώνεται (Burke et

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

al., 1990). Επομένως, η εφαρμογή άρδευσης μειώνει την θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας και την επαναφέρει εντός του TKW συμβάλλοντας στην διατήρηση των πλέον κατάλληλων συνθηκών για την πραγματοποίηση των βιοχημικών αντιδράσεων.

Στις Η.Π.Α. μετά από σχετική έρευνα διαπιστώθηκε ότι η παραγωγή βαμβακιού μεγιστοποιήθηκε όταν η άρδευση εφαρμόζονταν κάθε φορά που η θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας υπερέβαινε τους 28 ^{o}C (Wanjura et al., 1990, 1992). Η θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας μετράται με υπέρυθρα θερμόμετρα. Παραλλαγή της μεθόδου είναι η καταγραφή του χρόνου κατά τον οποίο η θερμοκρασία της καλλιέργειας βρίσκεται πάνω από τους 28 ^{o}C. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται χρονοθερμοκρασιακό όριο (Temperature-Time Threshold, TTT) (Wanjura et al., 1995). Από την έρευνα προέκυψε ότι εφαρμόζοντας την μέθοδο TTT για 4 ώρες η παραγωγή που επετεύχθη ήταν ίση με αυτή που παρατηρήθηκε για μικρότερες τιμές του TTT με παράλληλη εφαρμογή μειωμένων δόσεων άρδευσης.

Η περαιτέρω έρευνα οδήγησε στην κατασκευή ενός συστήματος που ονομάζεται "BIOTIC" (Upchurch et al., 1996). Το σύστημα "BIOTIC" χρησιμοποιεί ένα υπέρυθρο θερμόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας φυλλώματος και ένα καταγραφικό όπου καταγράφεται η διάρκεια κατά την οποία η θερμοκρασία αυτή υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο θερμοκρασίας φυλλώματος. Το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία φυλλώματος υπερβαίνει το προκαθορισμένο όριο αθροίζεται και όταν το άθροισμα αυτό υπερβεί ένα άλλο προκαθορισμένο όριο τότε ενεργοποιείται το σύστημα άρδευσης. Το σύστημα "BIOTIC" δεν συστήνεται για την αυτοματοποίηση αρδεύσεων όταν η καλλιέργεια βρίσκεται στα αρχικά στάδια γιατί η θερμοκρασία από το ακάλυπτο έδαφος επηρεάζει τη συχνότητα άρδευσης (Maas, 2008).

2.4.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες αυξημένης εξάτμισης, η θερμοκρασία του φυλλώματος είναι μικρότερη από αυτή της ατμόσφαιρας. Η διαφορά των δύο θερμοκρασιών μπορεί να αποτελέσει ένα δείκτη καταπόνησης της καλλιέργειας από την έλλειψη νερού. Έτσι αναπτύχθηκε ο όρος «Δείκτης Υδατικής Καταπόνησης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Καλλιεργειών» (Crop Water Stress Index, CWSI) (Jackson et al., 1981, Idso et al, 1981).

Ο δείκτης CWSI εκφράζει το βαθμό στον οποίο η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας προσεγγίζει την μέγιστη εξατμισοδιαπνοή (ET) λόγω των κλιματικών συνθηκών (δυναμική ET, PET). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{PET} \tag{2.8}$$

όπου η PET υπολογίζεται από τα κλιματολογικά δεδομένα ή εκτιμάται από την ET καλλιεργειών αναφοράς όπως ο χλοοτάπητας ή η καλλιέργεια αλφαλφα. Ο δείκτης CWSI μπορεί να υπολογιστεί από τις θερμοκρασίες φυλλώματος (T_c) και ατμόσφαιρας (T_a) χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_{\min} - (T_c - T_a)_{obs}]}{[(T_c - T_a)_{\min} - (T_c - T_a)_{\max}]} \tag{2.9}$$

Σε αυτή την εξίσωση ο παράγοντας $(T_c - T_a)_{obs}$ εκφράζει τις διαφορές που προκύπτουν από την παρατήρηση ενώ οι παράγοντες $(T_c - T_a)_{min}$ και $(T_c - T_a)_{max}$ εκφράζουν τις ελάχιστες και μέγιστες αναμενόμενες διαφορές λόγω της ποικιλίας κλιματικών συνθηκών. Έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν τους παράγοντες $(T_c - T_a)_{min}$ και $(T_c - T_a)_{max}$ με την πίεση υδρατμών κορεσμού για πλήθος καλλιεργειών (Idso, 1982). Ο δείκτης CWSI δεν δίνει καλά αποτελέσματα όταν η καλλιέργεια βρίσκεται σε νεαρό στάδιο γιατί επηρεάζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που βελτίωσαν την τεχνική του δείκτη CWSI σε περιπτώσεις που η βλάστηση δεν καλύπτει πλήρως την επιφάνεια του εδάφους. Μια από τις οποίες είναι η μέθοδος του «Τραπεζοειδή Δείκτη Βλάστησης/Θερμοκρασίας» (Vegetation Index/Temperature Trapezoid, VIT) με την οποία υπολογίζεται ο δείκτης έλλειψης νερού (Water Deficit Index, WDI) (Moran et al., 1994).

2.5. Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΙΝΩΔΟΥΣ ΣΟΡΓΟΥ

2.5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το σόργο ενδημεί στην Κεντρική και Ανατολική Αφρική και ανήκει στην Οικογένεια Poaceae. Είναι μονοετές ή πολυετές και μπορεί να φτάσει σε ύψος τα 5,5m. Το ριζικό του σύστημα είναι θυσσανωτό, ο βλαστός κατακόρυφος. Φέρει 7-10 γόνατα και από κάθε γόνατο φύεται ένα φύλλο το οποίο αποτελείται από

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κολεό και έλασμα. Μεταξύ κολεού και ελάσματος αναπτύσσεται ένα τριχωτό γλωσσίδιο. Η ταξιανθία είναι φόβη, όρθια ή κυρτή και αναπτύσσεται στην κορυφή του φυτού. Η ταξιανθία φέρει τους στάχεις και τα σταχίδια. Τα άνθη είναι αυτογονιμοπιούμενα και σταυρογονιμοποιούμενα. Ο καρπός είναι καρύοψη, σφαιρική ή ωοειδής, χρώματος λευκού, κίτρινου, κόκκινου ή καφέ. Το βάρος των 1000 σπόρων κυμαίνεται μεταξύ 12 και 40g. Πολλαπλασιάζεται με σπέρματα και συγκομίζεται με θεριζοαλωνιστικές μηχανές (Βαρδαβάκης, 1994).

Το γένος *Sorghum* [(*Sorghum bicolor (L.) Moench*] περιλαμβάνει το καρποδοτικό, το χορτοδοτικό, υβρίδια σόργου με σόργο του Σουδάν και το σόργο του Σουδάν. Αυτά τα είδη σόργου έχουν μικρή εμπορική αξία αλλά αποκτούν σημαντική οικονομική αξία όταν χρησιμοποιούνται ως ζωοτροφή αλλά και όταν αξιοποιούνται βιομηχανικά για την παραγωγή χαρτιού, σακχάρων και αιθανόλης. Τα περισσότερα είδη έχουν τη δυνατότητα να αδελφώνουν ενώ παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας οπότε και εισέρχονται σε λήθαργο από το οποίο εξέρχονται και συνεχίζουν την ανάπτυξή τους όταν οι συνθήκες το επιτρέψουν (Fribourg, 1995).

Το χορτοδοτικό σόργο περιλαμβάνει το ινώδες ή κυτταρινούχο και το γλυκό σόργο. Το ύψος του είναι μεγαλύτερο από του καρποδοτικού, η ταξιανθία του είναι πιο ανοιχτή και παράγει λιγότερους σπόρους ενώ ο βλαστός του περιέχει σάκχαρα. Έχει αναφερθεί ότι παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ξηρής βιομάζας από το καλαμπόκι όταν εφαρμόζεται η ίδια δόση άρδευσης (Anderson and Guyer, 1986, Teutsch, 2009). Η θρεπτική αξία του σόργου μπορεί να είναι υψηλή, εφάμιλλη αυτής του καλαμποκιού όταν γίνεται σωστή διαχείριση της καλλιέργειας (Roth and Harper, 1995).

2.5.2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Το χορτοδοτικό σόργο είναι ανθεκτικό στην ξηρασία αλλά ευαίσθητο στις χαμηλές θερμοκρασίες. Σε περιόδους ξηρασίας εισέρχεται σε λήθαργο και όταν οι συνθήκες βελτιωθούν συνεχίζει την ανάπτυξή του, σε αντίθεση με το καλαμπόκι, το οποίο σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας μηδενίζει την παραγωγή του. Η καλλιέργειά του συνιστάται σε εδάφη μέτριας ή χαμηλής γονιμότητας, με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού, οπότε και παράγει περισσότερο από το καλαμπόκι. Το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

χορτοδοτικό σόργο είναι πιο απαιτητικό σε υγρασία εδάφους από το καρποδοτικό (Παπακώστα, 1996).

Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η βλάστηση του σπόρου είναι περίπου 20°C για 3-4 συνεχόμενες ημέρες (Kneipp, 2006). Η κύρια ανάπτυξη λαμβάνει χώρα κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο και ευνοείται όταν η διάρκεια της ημέρας είναι μεγάλη και η θερμοκρασία υψηλή (25-30°C) (Fribourg, 1995). Η άριστη θερμοκρασία για την ανάπτυξή του είναι 37°C (Σφήκας, 1991). Καλλιεργείται σε εδάφη που το pH τους κυμαίνεται μεταξύ 6,0 και 7,0 (Marsalis, 2006).

2.5.3. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ

2.5.3.1 Προετοιμασία του Εδάφους

Το σόργο απαιτεί ζεστό, υγρό και καλά αεριζόμενο έδαφος έτσι ώστε ο σπόρος να έρχεται σε καλή επαφή με αυτό για γρήγορη βλάστηση. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που εξασφαλίζουν τέτοιες συνθήκες σποροκλίνης.

Βασικός στόχος της προετοιμασίας του εδάφους είναι να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες για την οικονομική επιτυχία της καλλιέργειας. Η καλή προετοιμασία του εδάφους περιλαμβάνει έλεγχο ζιζανίων, διατήρηση της εδαφικής υγρασίας, εφαρμογή ή μη εφαρμογή άροσης, έλεγχο της διάβρωσης του εδάφους από τον αέρα ή το νερό και ψιλοχωμάτισμα για την καλή επαφή του σπόρου με το έδαφος (Shroyer et al. 1998).

2.5.3.2 Λιπαντικές Απαιτήσεις

Η λιπαντική αγωγή που πρέπει να ακολουθηθεί στο σόργο είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθείται στην καλλιέργεια του καλαμποκιού για ενσίρωση (Mortvedt et al., 1996).

Για μια ορθολογική λίπανση θα πρέπει πάντα να προηγείται χημική ανάλυση του εδάφους. Ωστόσο, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα αυτή τότε σύμφωνα με μια γενική προσέγγιση η ποσότητα φωσφόρου και καλίου που πρέπει να εφαρμοστεί κυμαίνεται μεταξύ 3,5 και 9,0Kg ανά στρέμμα. Η ποσότητα της αζωτούχου λίπανσης εξαρτάται από την επιθυμητή παραγωγή και γενικά για τις υπερπαραγωγικές ποικιλίες μπορεί να φτάσει τα 22,5Kg ανά στρέμμα όταν εφαρμόζεται άρδευση και 2,0Kg ανά στρέμμα όταν δεν εφαρμόζεται καθόλου άρδευση. Η διαφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι σε περιοχές όπου δεν

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εφαρμόζεται άρδευση ο πληθυσμός των φυτών είναι μικρός και η παραγωγή ελάχιστη (Mortvedt et al., 1996).

2.5.3.3 Σπορά

Η σπορά γίνεται όταν η θερμοκρασία του εδάφους στο βάθος σποράς είναι περίπου 20°C για 3-4 συνεχόμενες ημέρες (Kneipp, 2006). Το βάθος σποράς διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Κυμαίνεται μεταξύ 2,5cm για τα βαριά εδάφη και 5,0cm για τα αμμουδερά. Η απόσταση των γραμμών σποράς μεταξύ τους είναι 75-80cm γιατί έχει παρατηρηθεί ότι επιτυγχάνεται η μέγιστη παραγωγή αλλά και γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαλεία κατεργασίας που διατίθενται στο εμπόριο ή ήδη κατέχουν οι παραγωγοί για την εξυπηρέτηση άλλων καλλιεργειών. Ο επιθυμητός πληθυσμός φυτών υπό συνθήκες άρδευσης είναι 10000 φυτά ανά στρέμμα (Shroyer et al. 1998). Επανασπορά πραγματοποιείται όταν ο πληθυσμός των φυτών είναι μικρότερος από 1500 φυτά ανά στρέμμα. Η φυτρωτικότητα του σπόρου κυμαίνεται στο 70 με 80% περίπου (Kneipp, 2006).

Για τις Ελληνικές συνθήκες η σπορά πραγματοποιείται από 10 Μαΐου έως αρχές Ιουλίου και ο επιθυμητός αριθμός φυτών ανά στρέμμα είναι 10000-12000.

2.5.3.4 Έλεγχος Ζιζανίων

Η παρουσία ζιζανίων πάντα δημιουργεί προβλήματα στην παραγωγικότητα και την οικονομικότητα των καλλιεργειών. Ως γενικά μέτρα καταπολέμησης των ζιζανίων αναφέρονται ο συνδυασμός μηχανικής κατεργασίας, αμειψισποράς και χημικής ζιζανιοκτονίας. Αμειψισπορά με σόγια ή σιτάρι δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Η τελευταία κατεργασία του εδάφους πρέπει να είναι επιφανειακή. Μια γενική καλλιεργητική τεχνική που εφαρμόζεται είναι η καταπολέμηση των ζιζανίων του σιταριού (όταν προηγείται της καλλιέργειας του σόργου) με τις ζιζανιοκτόνες ουσίες glyphosate, 2-4D (άλας νατρίου, εστέρα και άλας αμίνης), dicamba και να ακολουθήσει επέμβαση με atrazine τον Αύγουστο. Σε πολύ καλής δομής εδάφη ο συνδυασμός μηχανικής κατεργασίας του εδάφους και χημική ζιζανιοκτονία με atrazine δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Όταν την καλλιέργεια σόργου την ακολουθεί καλλιέργεια σόγιας τότε μια απλή κατεργασία είναι αρκετή (Regehr, 1998).

Σε περιπτώσεις που ο αριθμός των ζιζανίων δεν είναι μεγάλος τότε αρκεί μια επέμβαση το Μάρτιο ή νωρίς τον Απρίλιο. Συνιστάται η εφαρμογή συνδυασμού

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

atrazine με λάδι και 2-4D για να ελεγχθούν τα χειμερινά και να αποτραπεί το φύτρωμα των σπόρων των περισσότερων ανοιξιάτικων ζιζανίων. Όταν παρατηρείται αυξημένος πληθυσμός ετήσιων αγρωστωδών και λουβουδιάς πριν τη σπορά τότε μπορεί να πραγματοποιηθεί μια επέμβαση με glyphosate ή εστέρα του 2-4D μια εβδομάδα πριν τη σπορά. Κατά τη σπορά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες ζιζανιοκτόνες ουσίες όπως το metolachlor υπό την προϋπόθεση ότι ο σπόρος είναι επενδεδυμένος. Εφαρμογή ατραζίνης (115gr ανά στρέμμα) πριν τις 15/4 ή με ενσωμάτωση μετά τη σπορά και πριν το φύτρωμα της καλλιέργειας δίνει επίσης πολύ καλά αποτελέσματα. Μετά το φύτρωμα του σόργου και όταν τα φυτά βρίσκονται στο στάδιο των 3-6 φύλλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μίγματα με ατραζίνη. Όταν το ύψος των φυτών του σόργου ξεπεράσει τα 20cm τότε προκαλούνται ζημιές από την εφαρμογή ζιζανιοκτόνων και ο ψεκασμός πρέπει να είναι κατευθυνόμενος. Τέλος για την καταπολέμηση όψιμων ζιζανίων συνιστάται σκάλισμα με μηχανικό σκαλιστήρι ή χειρονακτικό σκάλισμα (Regehr, 1998).

2.5.3.5 Συγκομιδή

Η συγκομιδή ξεκινά όταν ο σπόρος έχει ξεραθεί σε ποσοστό πάνω από 50% ή όταν η υγρασία ολόκληρου του φυτού κυμαίνεται μεταξύ 60 και 70%. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή και η βέλτιστη ποιότητα του προϊόντος καθώς και η μέγιστη αποδοχή από τα ζώα. Συγκομιδή όταν η υγρασία του φυτού είναι πάνω από 70% έχει ως συνέπεια την κακή ξήρανση εντός των ξηραντήριων και την υποβάθμιση του προϊόντος. Αντίθετα, συγκομιδή πολύ ξηρού προϊόντος έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας οξυγόνου και επομένως την ανάπτυξη θερμοκρασίας, η οποία καταστρέφει τις πρωτεΐνες οπότε το προϊόν γίνεται δύσπεπτο από τα ζώα και χαμηλής ενεργειακής ποιότητας. Για τον προσδιορισμό της κατάλληλης εποχής για τη συγκομιδή, οι παραγωγοί θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την εποχή ωρίμανσης, το ύψος των φυτών, τη δυνατότητα αποθήκευσης και την περιεχόμενη ξηρή μάζα. Οι παραγωγοί θα πρέπει να επιλέγουν ποικιλίες που προσαρμόζονται καλά στην περιοχή που πρόκειται να καλλιεργηθούν και να αποφεύγουν ποικιλίες με οριακά χαρακτηριστικά (Bolsen, 2004). Κατά τη συγκομιδή παρατηρούνται απώλειες της τάξης του 5% όταν η μηχανή συγκομιδής είναι καλά συντηρημένη και ρυθμισμένη (Taylor, 1998).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Ορισμένοι ερευνητές προτείνουν πριν την συγκομιδή να πραγματοποιείται ένας ψεκασμός με ζιζανιοκτόνες ουσίες για να επιταχύνεται η συγκομιδή αλλά και να αυξάνεται η αποδοτικότητά της. Οι χημικές ουσίες που εφαρμόζονται είναι η glyphosate και η diquat. Η τεχνική αυτή έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ωρίμανσης του σπόρου. Ο χρόνος εφαρμογής είναι μια κρίσιμη παράμετρος, η οποία πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Συνιστάται ο ψεκασμός να γίνεται όταν η θερμοκρασία είναι ακόμα σε υψηλά επίπεδα και η καλλιέργεια έχει φτάσει στη φυσιολογική ωρίμανση (υγρασία ≈ 25%). Σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες, ο ψεκασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν η καλλιέργεια είναι πράσινη ακόμη έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή αλλά και να αποθηκευτεί στο έδαφος αρκετό νερό για την επόμενη καλλιέργεια (Kneipp, 2006).

2.5.4. ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

Κρίνεται απαραίτητο να δοθούν ορισμένες διευκρινήσεις για τα στάδια ανάπτυξης του σόργου. Μερικά πρώιμα στάδια ανάπτυξης αναγνωρίζονται από τον αριθμό των φύλλων ενώ τα περισσότερα έχουν σαφή διαχωρισμό (Vanderlip, 1972, 1993).

Η έναρξη φυτρώματος αποτελεί το πρώτο στάδιο. Αναγνωρίζεται από το γεγονός ότι τα πρώτα φυτάρια εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό συμβαίνει περίπου τις 10 πρώτες ημέρες μετά από την σπορά. Ο χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση των φυταρίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία εδάφους, την εδαφική υγρασία, το βάθος σποράς και τη φυτρωτικότητα του σπόρου. Ψυχρές συνθήκες κατά το στάδιο αυτό ευνοούν την ανάπτυξη ασθενειών (Vanderlip, 1972, 1993).

Το επόμενο στάδιο είναι αυτό των τριών πραγματικών φύλλων. Γίνεται αντιληπτό όταν το κολάρο, δηλαδή το σημείο ένωσης του ελάσματος του φύλλου με τον κολεό, μπορεί να αναγνωριστεί χωρίς να γίνει διαχωρισμός των διαφόρων μερών του φυτού. Στο στάδιο αυτό του φυτού η θερμοκρασία παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην ανάπτυξη του φυτού. Το σημείο αύξησης του φυτού βρίσκεται ακόμη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους οπότε το φυτό δεν επηρεάζεται από τυχόν απώλεια του υπέργειου τμήματος κυρίως λόγω εφαρμογής χημικής ζιζανιοκτονίας. Η εμφάνισή του γίνεται περίπου 10 ημέρες μετά το φύτρωμα του σπόρου (Vanderlip, 1972, 1993).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Το τρίτο στη σειρά στάδιο είναι αυτό που ονομάζεται στάδιο 5 πραγματικών φύλλων. Εμφανίζεται περίπου 3 εβδομάδες μετά την εμφάνιση των φυταρίων στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά το στάδιο αυτό το φυτό αναπτύσσει το ριζικό του σύστημα με αποτέλεσμα τα πρώτα φύλλα να εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους. Από το στάδιο αυτό και έπειτα αρχίζει η συσσώρευση της ξηρής μάζας με σχεδόν σταθερό ρυθμό εφόσον οι συνθήκες είναι κατάλληλες. Η εμφάνιση δυσμενών συνθηκών κατά το στάδιο αυτό (ζιζάνια, καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού ή θρεπτικών, ανάπτυξη ασθενειών) περιορίζει την παραγωγή (Vanderlip, 1972, 1993).

Η διαφοροποίηση είναι το τέταρτο στάδιο. Η ανάπτυξη φυλλικής επιφάνειας σταματά και αρχίζει η ανάπτυξη του αναπαραγωγικού τμήματος του φυτού (ταξιανθία). Συνήθως ο συνολικός αριθμός φύλλων έχει σχηματιστεί (7-10) ενώ και η ταξιανθία είναι έτοιμη να εμφανιστεί. Περίπου το 30% της συνολικής επιφάνειας του φύλλου έχει σχηματιστεί ενώ τα κατώτερα 1-3 φύλλα μπορεί να έχουν χαθεί. Η ανάπτυξη του βλαστού είναι ταχύτατη και η απορρόφηση θρεπτικών έντονη. Γενικά, από την σπορά μέχρι τη διαφοροποίηση έχει μεσολαβήσει χρονικό διάστημα ίσο με το ένα τρίτο του χρόνου που απαιτείται από τη σπορά έως τη φυσιολογική ωρίμανση του φυτού. Το στάδιο αυτό εμφανίζεται περίπου 30 ημέρες από το φύτρωμα και το φυτό απαιτεί καλή άρδευση και θρέψη (Vanderlip, 1972, 1993).

Το πέμπτο στάδιο χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση του φύλλου σημαίας. Κατά το στάδιο αυτό παρατηρείται έντονη ανάπτυξη του βλαστού και των φύλλων. Στο στάδιο αυτό το 70% των φύλλων έχει πλήρως αναπτυχθεί (απομένουν τα 3-4 τελευταία) καθώς και το 80% της φυλλικής επιφάνειας. Η απορρόφηση ηλιακής ενέργειας, θρεπτικών στοιχείων και η ανάπτυξη εξακολουθούν να πραγματοποιούνται με υψηλούς ρυθμούς. Τα κατώτερα 1-5 φύλλα μπορεί να έχουν χαθεί οπότε η αρίθμηση των φύλλων ξεκινά από την κορυφή και από το φύλλο σημαία. Αν και στο στάδιο αυτό έχει ολοκληρωθεί μόλις το 20% της ανάπτυξης του φυτού, έχει ήδη απορροφηθεί αρκετά μεγάλο μέρος των θρεπτικών και το 40% του K (Vanderlip, 1972, 1993).

Το επόμενο στάδιο είναι το στάδιο της άνθησης, στο οποίο όλα τα φύλλα έχουν πλέον πλήρως αναπτυχθεί. Η φυλλική επιφάνεια είναι μέγιστη καθώς και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ταξιανθία έχει πλέον αναπτυχθεί πλήρως

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και περιβάλλεται από τον κολεό του φύλλου σημαίας. Η ανάπτυξη του βλαστού έχει ολοκληρωθεί και αρχίζει η επιμήκυνση του ποδίσκου της ταξιανθίας. Στο στάδιο αυτό τυχόν καταπόνηση του φυτού λόγω άρδευσης ή θρεπτικών έχει ως αποτέλεσμα η ταξιανθία να μην εκπτυχθεί από τον κολεό του φύλλου σημαίας (Vanderlip, 1972, 1993).

Το έβδομο στάδιο είναι το στάδιο της μισής άνθισης. Στον αγρό αναγνωρίζεται από το γεγονός ότι τα μισά φυτά βρίσκονται σε κάποιο από τα στάδια της άνθισης. Η ταξιανθία πλέον είναι ορατή πάνω από τα φύλλα και η άνθιση έχει προχωρήσει στο μισό της (περίπου 4-5 ημέρες από την έναρξη της άνθισης της ταξιανθίας). Η άνθιση ξεκινά από την κορυφή της ταξιανθίας και συνεχίζεται προς τα κάτω. Κατά το στάδιο αυτό έχει παραχθεί το 50% περίπου της ξηρής μάζας του φυτού ενώ έχουν απορροφηθεί 70, 60 και 80% από τα θρεπτικά στοιχεία N, P και K, αντίστοιχα. Ο χρόνος κατά τον οποίο εμφανίζεται το στάδιο αυτό εξαρτάται από το υβρίδιο που καλλιεργείται, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και συνήθως είναι ίσος με τα δύο τρίτα του χρόνου που απαιτείται από την σπορά μέχρι την φυσιολογική ωρίμανση. Έλλειψη νερού σε αυτό το στάδιο προκαλεί μειωμένη παραγωγή σπόρου από την ταξιανθία του φυτού (Vanderlip, 1972, 1993).

Το γαλάκτωμα του σπόρου αποτελεί το όγδοο στάδιο. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται το γέμισμα του σπόρου με ταχύς ρυθμούς. Συνήθως, το μισό ξηρό βάρος του σπόρου επιτυγχάνεται σε αυτό το στάδιο. Μετά το στάδιο της μισής άνθισης το βάρος του βλαστού αυξάνεται ενώ από το στάδιο του γαλακτώματος αρχίζει να μειώνεται επειδή μορφοποιείται έντονα ο σπόρος. Η μείωση του βάρους του βλαστού κυμαίνεται περίπου στο 10% του βάρους των σπόρων. Κατά το στάδιο αυτό περίπου 7-8 φύλλα έχουν απομείνει στο φυτό(Vanderlip, 1972, 1993).

Το ένατο στάδιο του φυτού είναι αυτό που ονομάζεται στάδιο μισής σκλήρυνσης. Κατά το στάδιο αυτό οι σπόροι έχουν αποκτήσει περίπου το 75% του βάρους τους. Η πρόσληψη θρεπτικών έχει ολοκληρωθεί, ο βλαστός έχει το μικρότερο βάρος. Είναι δυνατό να έχουν χαθεί και επιπλέον φύλλα (Vanderlip, 1972, 1993).

Τελευταίο είναι το στάδιο της φυσιολογικής ωρίμανσης. Το φυτό έχει διαμορφώσει τη μέγιστη ξηρή βιομάζα. Το στάδιο αυτό καθορίζεται από τη μαύρη κηλίδα στην αιχμή του σπόρου. Ο χρόνος μεταξύ άνθισης και φυσιολογικής ωρίμανσης ποικίλει ανάλογα με το υβρίδιο που καλλιεργείται, τις περιβαλλοντικές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

συνθήκες και συνήθως αποτελεί το ένα τρίτο του συνολικού χρόνου από τη σπορά. Η υγρασία του σπόρου κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35% και εξαρτάται από το υβρίδιο και τις συνθήκες ανάπτυξης. Μετά την φυσιολογική ωρίμανση τα φύλλα που απέμειναν διατηρούν το πράσινο χρώμα τους ή ξηραίνονται αργά. Όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές μπορεί να εμφανιστούν διακλαδώσεις από τα ανώτερα γόνατα. Ο βλαστός μπορεί να αυξήσει και πάλι το βάρος του, ελαφρώς (Vanderlip, 1972, 1993).

Για την περιοχή της Μεσογείου η διάρκεια του βιολογικού κύκλου του σόργου είναι 130 ημέρες από το φύτρωμα του σπόρου (Allen, 1998). Για τις συνθήκες της Θεσσαλίας η διάρκεια των παραπάνω σταδίων για σπορά στο δεύτερο δεκαήμερο του Μαΐου είναι:

- Φύτρωμα: 15 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο 3 Φύλλων: 20-25 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο 5 Φύλλων: 45 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Διαφοροποίησης: 50 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Φύλλου Σημαίας: 55-60 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Άνθισης: 70-80 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Μισής Άνθισης: 80-90 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Γαλάκτωμα Σπόρου: 90-100 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Μισής Σκλήρυνσης Σπόρου: 100-110 ημέρες από τη σπορά,
- Στάδιο Φυσιολογικής Ωρίμανσης: 110-145 ημέρες από τη σπορά.

2.5.5. ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΒΟΛΕΣ

2.5.5.1 Μυκητολογικές Ασθένειες

Οι ασθένειες του σόργου κυμαίνονται στα επίπεδα των υπόλοιπων καλλιεργειών. Το ποσοστό ζημιάς εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από την αντοχή των φυτών. Έρευνες στο Κάνσας έχουν αποδείξει ότι ο μέσος όρος απώλειας στην παραγωγή ετήσιου σόργου ανέρχεται στο 5% (Jardine, 1998).

Κυριότερες ασθένειες είναι οι σήψεις, οι ιώσεις και οι βακτηριώσεις. Οι σήψεις σπόρων προκαλούνται από τους μύκητες Fusarium, Rhizopus, Aspergillus, Penicillium και Pythioum. Οι σήψεις λαιμού και στελέχους προκαλούνται από τους μύκητες Fusarium spp. και Macrophomina phaseolina. Οι ιώσεις που αναφέρονται προκαλούνται από τον ιό του καλαμποκιού και του ζαχαροκάλαμου. Από τις

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

βακτηριώσεις σημαντικότερες είναι η βακτηριακή ράβδωση (Pseudomonas andropogonii) και η βακτηριακή αυλάκωση (Xanthomonas holcicola) οι οποίες προσβάλουν το φύλλωμα (Jardine, 1998).

Η φυλλική επιφάνεια του σόργου είναι πιο ευαίσθητη σε προσβολές. Ως κυριότερες αναφέρονται οι άνθρακες (Ramulispora sorghi), οι σκωριάσεις (Puccinia purpurea), οι δαυλίτες (Sclerophthora macrospora, Peronosclerospora sorghi), η ανθράκωση (Colletotrichum graminicola) και η δακτυλιωτή κηλίδωση (Gleocercospora sorghi). Η ταξιανθία συνήθως προσβάλλεται από δαυλίτες (Sporisorium reilianum) και οι κηλίδες έχουν χρώμα κόκκινο, καφέ ή μαύρο και εμφανίζονται 7-10 ημέρες μετά από ψεκασμό για την καταπολέμηση αφίδων. Στο στάδιο όπου η ταξιανθία είναι πλέον ορατή πάνω από το φύλλωμα, οι κηλίδες έχουν επίμηκες σχήμα και μοιάζουν με αυτές των βακτηριώσεων και των ιώσεων. Γενικά υγρές συνθήκες κατά τη διάρκεια των πρωινών και ξηρές συνθήκες την υπόλοιπη ημέρα ευνοούν την ανάπτυξη τέτοιων ασθενειών (Jardine, 1998). Οι σπόροι προσβάλλονται από εργοτίαση (Claviceps africana) (Θανασουλόπουλος, 1995, Jardine, 1998).

Η αντιμετώπιση των παραπάνω ασθενειών γίνεται με την εφαρμογή κυρίως μέτρων πρόληψης και λιγότερο με χημικό τρόπο. Τα κυριότερα μέτρα πρόληψης είναι η καλλιέργεια ανθεκτικών υβριδίων, η χρήση καθαρού και απολυμασμένου σπόρου, η απομάκρυνση των υπολειμμάτων της προηγούμενης καλλιέργειας και η καταστροφή τους, η αμειψισπορά, η κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους, η κατάλληλη εποχή σποράς και η εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών γρήγορου φυτρώματος και ταχείας ανάπτυξης του φυτού. Όταν η προσβολή κρίνεται σημαντική τότε εφαρμόζονται τα κατάλληλα μυκητοκτόνα Θανασουλόπουλος, 1995, Jardine, 1998).

Για τις συνθήκες της Θεσσαλίας η κυριότερη ασθένεια είναι η ελμινθοσπορίαση του αραβοσίτου. Η ασθένεια αυτή προκαλείται από τους μύκητες (Helminthosporium tutricum Pass, Helminthosporium carbonum Ullstrup, Helminthosporium maydis Nisik, Helminthosporium rostratum Drechs) (Θανασουλόπουλος,1995). Έχει κοκκινοκαστανές επιμήκεις κηλίδες οι οποίες ενώνονται όσο προχωρά η ασθένεια και καλύπτουν ολόκληρο το φύλλωμα. Για την καταπολέμησή της εκτός των μέτρων πρόληψης απαιτείται χρήση κατάλληλων μυκητοκτόνων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2.5.5.2 Εντομολογικές Προσβολές

Οι εντομολογικές προσβολές είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στην καλλιέργεια.

Οι εντομολογικές προσβολές προκαλούνται τόσο από σκουλήκια εδάφους όσο και από έντομα φυλλώματος. Σκουλήκια εδάφους και ψευτοσκούλικα που προσβάλουν το σπόρο προκαλούν σημαντικά προβλήματα στην καλή εγκατάσταση της καλλιέργειας στον αγρό. Η εμφάνισή τους περιορίζεται όταν η πίεση στο έδαφος από τα γεωργικά μηχανήματα είναι 4-6Kg ανά εκατοστό πλάτους τροχού. Για τη χημική καταπολέμηση χρησιμοποιούνται η χημική ουσία chlorpyrifos κατά τη σπορά ή η imidacloprid για επένδυση του σπόρου. Τα μυζητικά έντομα (αφίδες) προκαλούν προβλήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας και είναι φορείς πολλών μυκητολογικών και ιολογικών ασθενειών (Κατής και Αυγελής 1997). Εμφανίζονται κατά το στάδιο του γεμίσματος του σπόρου και είναι μικρής οικονομικής σημασίας (Kneipp, 2006). Όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές εμφανίζονται σε προηγούμενα στάδια ενώ όταν η εμφάνιση γίνεται πολύ πρώιμα (στάδιο διαφοροποίησης) συνιστάται χημική καταπολέμηση. Δρουν ακόμη και όταν οι συνθήκες είναι ξηρές. Συνιστάται μια επέμβαση να γίνεται κατά τη σπορά οπότε και αντιμετωπίζονται πιθανές προσβολές και από άλλα έντομα ή όταν ο πληθυσμός των εντόμων καθιστά απαραίτητη την χημική επέμβαση (π.χ. 30 ενήλικα ανά ταξιανθία) (Σταμόπουλος, 1995, Leroy Brooks, 1998).

Το πράσινο σκουλήκι αποτελεί ίσως την σημαντικότερη εντομολογική προσβολή για το σόργο όπως και για το καλαμπόκι (Σταμόπουλος, 1995, Leroy Brooks, 1998). Το πράσινο σκουλήκι παρουσιάζει ανθεκτικότητα στις πυρεθρίνες και τα καρβαμιδικά εντομοκτόνα. Έλεγχος γίνεται νωρίς το πρωί τουλάχιστο μία φορά την εβδομάδα. Η επέμβαση πρέπει να γίνεται όταν το έντομο βρίσκεται στο στάδιο της κάμπιας (≤ 5cm).

2.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ

2.6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το σόργο καλλιεργείται σε πολλές άνυδρες και ημιξηρικές περιοχές του κόσμου λόγω της ικανότητάς του να παράγει ικανοποιητικά σε συνθήκες περίσσειας ή έλλειψης νερού (Muchow, 1989). Γενικά, απαιτεί λιγότερο νερό για την παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας ξηρής βιομάζας σε σύγκριση με το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καλαμπόκι (Martin et al., 1976). Ακόμα και σε περιπτώσεις που η αποδοτικότητα χρήσης νερού μεταξύ σόργου και καλαμποκιού είναι η ίδια, το καλαμπόκι τείνει να χρησιμοποιεί περισσότερο νερό λόγω του μεγαλύτερου βιολογικού του κύκλου (Howell et al., 1997). Επιπροσθέτως, το σόργο έχει τη δυνατότητα να παράγει ικανοποιητικά ακόμα και υπό συνθήκες καταπόνησης από την έλλειψη νερού και να ανακτά τους κανονικούς ρυθμούς ανάπτυξής του όταν οι δυσμενείς συνθήκες εξομαλυνθούν (Rogers, 1998).

Στην Αμερική αποτελεί την 5η πιο δημοφιλή καλλιέργεια μετά το καλαμπόκι, το σιτάρι, τη σόγια και το τριφύλλι. Καλύπτει έκταση 1.000.000 αρδευόμενων στρεμμάτων. Οι απαιτήσεις του σε νερό εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν κάθε χρονιά και κυμαίνονται μεταξύ 450-500 χιλιοστά για κανονική παραγωγή. Το σόργο αναπτύσσει ριζικό σύστημα που φτάνει τα 180cm σε εδάφη που δεν είναι συμπιεσμένα ή δεν έχουν αδιαπέραστο ορίζοντα. Οι υπολογισμοί άρδευσης γίνονται για βάθος ριζοστρώματος 90cm ενώ το 75% του νερού απορροφάται από το πάνω 50% των ριζών. Όταν καλλιεργείται σε βαριά εδάφη (ιλυοπηλώδη, αργιλοπηλώδη) μπορεί να παράγει το 80-90% της παραγωγής του με μόλις 150-200 χιλιοστά νερού άρδευσης. Το όριο εξάντλησης είναι 50% αλλά το καρποδοτικό σόργο δίνει ικανοποιητική παραγωγή και όταν το όριο εξάντλησης είναι 40 ή ακόμα και 30%. Ωστόσο, οι αντοχές του σόργου στην έλλειψη υγρασίας είναι περιορισμένη εντός συγκεκριμένων ορίων και όταν συμβαίνει αυτό παρατηρείται καθυστέρηση στην ωρίμανση. Συμπερασματικά, απαιτεί 7,6 χιλιοστά νερού ανά ημέρα με τις μέγιστες απαιτήσεις να παρατηρούνται στο αναπαραγωγικό στάδιο (New, 2004), στο οποίο απαιτούνται 150-200 χιλιοστά νερού (Rogers, 1998).

2.6.2. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Το σόργο καλλιεργείται το καλοκαίρι και σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές του καλαμποκιού αποδεικνύεται περισσότερο ανθεκτικό (Krieg and Lascano, 1990 Camargo and Hubbard, 1999). Η ανθεκτικότητά του αυτή οφείλεται:

- στο πυκνό και πλούσιο ριζικό του σύστημα το οποίο είναι ικανό να απορροφά νερό από βαθύτερα στρώματα του εδάφους (Wright and Smith, 1983, Singh and Singh, 1995),

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- στην ικανότητά του να ρυθμίζει την οσμωτική πίεση στο εσωτερικό του φύλλου και να κρατά με αυτό τον τρόπο τα στομάτια ανοιχτά ακόμη και όταν το φύλλο περιέχει μικρή ποσότητα νερού (Ludlow et al., 1990, Girma and Krieg, 1992),
- στην ικανότητά του να καθυστερεί την αναπαραγωγική ανάπτυξή του (Wright et al., 1983).

Παράγοντες όπως οι κλιματολογικές συνθήκες, το έδαφος, η διαχείριση της καλλιέργειας και οι πρακτικές άρδευσης επηρεάζουν την σχέση παραγωγής και χρήσης νερού (Doorenbos and Pruitt, 1977, Hanks, 1983). Οι Darusman et al., (1997) διαπίστωσαν ότι υπερβολική υγρασία στο περιβάλλον της φυλλικής επιφάνειας που παρατηρείται μετά από άρδευση με καταιονισμό ελαχιστοποιεί το κλείσιμο των στομάτων κατά τη διάρκεια που επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες ή ισχυροί άνεμοι ενισχύοντας την αναπνοή του φυτού και ελαττώνοντας την διαπνοή. Οι Bordovsky and Lyle, (1996) εξέτασαν την επίδραση τεσσάρων δόσεων άρδευσης (40, 70, 100 και 130% της εξατμισοδιαπνοής) χρησιμοποιώντας αυλάκια και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παραγωγή δεν επηρεάστηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης 70% και πάνω. Οι Farré and Faci, (2006) σε έρευνα που πραγματοποίησαν διαπίστωσαν ότι το σόργο έδωσε ικανοποιητική παραγωγή υπό συνθήκες μέτριας και σοβαρής έλλειψης νερού (73, 64 και 47% της εξατμισοδιαπνοής). Οι δόσεις άρδευσης που εφαρμόστηκαν ήταν 100, 93, 86, 73, 64 και 47% της εξατμισοδιαπνοής και το σύστημα άρδευσης καταιονισμός. Οι Tyagi et al, (2000) αναφέρουν ότι όταν η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή είναι πάνω από 4 χιλιοστά ανά ημέρα τότε το σόργο πρέπει να αρδεύεται για να δώσει καλή παραγωγή.

Οι Gardner et al, (1981) πραγματοποίησαν έρευνα σχετικά με την επίδραση της άρδευσης σε διάφορα στάδια του σόργου. Οι μεταχειρίσεις που οργάνωσαν ήταν α) ελλειμματική άρδευση σε όλα τα στάδια (1-10), β) ελλειμματική άρδευση στα 7 πρώτα στάδια (1-7) και κανονική στα 3 τελευταία (8-10), γ) ελλειμματική άρδευση στα πρώτα 4 στάδια (1-4) και κανονική στα επόμενα 6 (5-10) και δ) κανονική άρδευση στα πρώτα 7 στάδια και ελλειμματική στα 3 τελευταία (8-10). Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι μεγαλύτερη παραγωγή παρατηρήθηκε στις δύο πρώτες μεταχειρίσεις και η εξήγηση που έδωσαν ήταν ότι τα φυτά ανέπτυξαν αντοχή στην καταπόνηση από την έλλειψη νερού ενώ τα φύλλα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

των ελλειμματικά αρδευόμενων φυτών παρουσίασαν μικρότερη διαπνοή. Μικρότερη παραγωγή έδωσε η τέταρτη μεταχείριση οδηγώντας στη διαπίστωση ότι τα στάδια εμφάνισης της ταξιανθίας και διαμόρφωσης και γεμίσματος του σπόρου είναι αρκετά ευαίσθητα στην έλλειψη νερού.

Οι Dercas and Liakatas, (1999) αναφέρουν ότι το ύψος και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) επηρεάζονται από την δόση άρδευσης. Διαπίστωσαν ότι στις ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις τα φυτά είχαν σημαντικά μικρότερο ύψος (1,0m) ενώ το LAI διέφερε κατά 1,5. Οι Dercas and Liakatas, (2006) αναφέρουν ότι η ελλειμματική άρδευση επηρεάζει την αποδοτικότητα χρήσης νερού και την αποδοτικότητα χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατήρησαν ότι τα φυτά που αρδεύτηκαν λιγότερο έδωσαν μικρότερη παραγωγή αλλά χρησιμοποίησαν αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Η αποδοτικότητα χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας ελαττώθηκε στις ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις. Οι Singh and Singh, (1995) αναφέρουν ότι σε φυτά σόργου που αρδεύονται μετρίως ελλειμματικά η αποδοτικότητα χρήσης νερού είναι μεγαλύτερη. Οι Steduto et al, (1997) αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα της φωτοσυνθετικής χρήσης νερού των φύλλων ήταν μεγαλύτερη σε συνθήκες καταπόνησης των φυτών. Αντίθετα, οι Berenguer and Faci (2001) διαπίστωσαν σημαντική απόδοση υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης. Οι Mastrorilli et al, (1999) υπολόγισαν μικρότερη αποδοτικότητα χρήσης νερού σε καλλιέργειες καταπονημένες από έλλειψη νερού όταν αυτή συνέβη στο στάδιο του φύλλου σημαίας αλλά μεγαλύτερη όταν η έλλειψη νερού εμφανίστηκε πριν την άνθιση σε σύγκριση με την αποδοτικότητα χρήσης νερού καλλιέργειας που αρδεύτηκε κανονικά.

Η ελλειμματική άρδευση μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις μειωμένης διαθεσιμότητας νερού και συνήθως αυξάνει την παραγωγή (Hiler and Howell, 1983). Οι Garrity et al. (1982) αναφέρουν ότι το βέλτιστο σχήμα ελλειμματικής άρδευσης είναι εκείνο κατά το οποίο μέρος των μέγιστων απαιτήσεων της καλλιέργειας εφαρμόζεται εβδομαδιαία αφήνοντας το έλλειμμα υγρασίας να αυξάνει βαθμιαία όσο προχωρά η καλλιεργητική περίοδος. Οι Stone et al. (1978) υποστηρίζουν ότι άρδευση κατά διαστήματα από το στάδιο της άνθισης έως την σκλήρυνση του σπόρου αυξάνουν την παραγωγή σπόρου σε σύγκριση με την παντελή έλλειψη άρδευσης. Επιπλέον, αρδεύσεις σε ορισμένα στάδια της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καλλιέργειας είναι δυνατό να περιορίσουν τις συνθήκες καταπόνησης της καλλιέργειας και να μειώσουν τις απαιτήσεις σε νερό, εξοπλισμό και εργατικά. Οι Sweeney and Lamm (1993) αναφέρουν ότι το βάρος των σπόρων επηρεάστηκε από την άρδευση και αυξήθηκε όταν η καλλιέργεια αρδεύτηκε κατά το στάδιο της άνθισης.

2.6.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Η άρδευση με συχνότητα μεγαλύτερη από την απαιτούμενη φαίνεται ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί επειδή αυξάνει το κόστος. Ωστόσο, στα μόνιμα συστήματα άρδευσης φαίνεται ότι η πρακτική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί. Μεγάλη συχνότητα άρδευσης μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε περιπτώσεις πλήρους άρδευσης (Rawlins and Raats, 1975, Phene and Sanders, 1976), είτε και σε περιπτώσεις ελλειμματικής άρδευσης (Miller and Aarstad, 1976) χωρίς να αυξάνεται το κόστος της άρδευσης. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, εφαρμόζονται δόσεις άρδευσης μικρότερες από την εξατμισοδιαπνοή με πολύ μικρό εύρος (Faci and Fereres, (1980).

Οι Ravelo et al. (1977) αναφέρουν ότι οι αποδόσεις του καρποδοτικού σόργου δεν επηρεάστηκαν όταν η συχνότητα στάγδην άρδευσης αυξήθηκε από 1 σε 3 αρδεύσεις ανά εβδομάδα. Το νερό που αποθηκεύεται στο έδαφος με την τεχνική αυτή παίζει σημαντικό ρόλο και καθορίζει την παραγωγή. Σε εδάφη που δεν έχουν τη δυνατότητα συγκράτησης νερού (αποθήκευσης), η εφαρμογή άρδευσης με συχνότητα μικρότερη από αυτή που απαιτεί η εξατμισοδιαπνοή καταπονεί το φυτό και επηρεάζει δυσμενώς την παραγωγή. Αντίθετα, σε εδάφη που έχουν τη δυνατότητα συγκράτησης νερού, οι αποδόσεις μπορεί να διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα επειδή το αποθηκευμένο νερό στο έδαφος συμβάλει στην ανάπτυξη του φυτού. Στο καρποδοτικό σόργο παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μείωση της παραγωγής όσο η εξατμισοδιαπνοή μειωνόταν με την εφαρμογή συχνής άρδευσης γιατί η μικρή συμβολή του εδαφικού νερού και η μεγάλη συχνότητα άρδευσης αύξησαν την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας οπότε το διαθέσιμο νερό για διαπνοή ήταν περισσότερο. Επιπλέον, η ανάκαμψη των φυτών στη μεταχείριση, όπου το εύρος άρδευσης ήταν μεγάλο, ήταν πιο ολοκληρωμένη εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας νερού που εφαρμόζονταν σε κάθε άρδευση (Faci and Fereres, (1980).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2.6.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΛΑΤΟΥΧΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ

Οι καλλιέργειες παρουσιάζουν διαφορετική ανθεκτικότητα στο αλατούχο νερό ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξής τους (Rhoades, 1984). Η διαπίστωση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην εφαρμογή νέων τεχνικών για τη διαχείριση αλατούχου νερού άρδευσης.

Πολλές εργασίες έχουν δείξει ότι η αντοχή των καλλιεργειών μεταβάλλεται όσο προχωρά η ανάπτυξή τους (Verma and Bains, 1974, Maas et al., 1983). Οι Fransois et al. (1984) αναφέρουν ότι το σόργο είναι μετρίως ανθεκτικό φυτό στα άλατα. Αναφέρεται ότι η αλατότητα του νερού επηρέασε σημαντικά το ύψος του φυτού στο 1^o στάδιο (2^o – 4^o σύμφωνα με την παράγραφο 2.5.4) αλλά τα φυτά ανέκαμψαν στα επόμενα. Εφαρμογή αλατούχου νερού στο 3^o στάδιο (8^o – 10^o σύμφωνα με την παράγραφο 2.5.4) δεν επηρέασε το ύψος. Η παραγωγή σπόρου μειώθηκε σημαντικά όταν η καταπόνηση από το αλατούχο νερό συνέβαινε κατά το 1^o στάδιο (μικρότερος αριθμός σπόρων αλλά μεγαλύτερου βάρους) και ελάχιστα όταν συνέβαινε κατά το 3^o ενώ η γονιμοποίηση δεν επηρεάστηκε. Η θερμογόνος δύναμη επηρεάστηκε σημαντικά τόσο από το στάδιο, στο οποίο εφαρμόστηκε η αλατούχος άρδευση, όσο και από την περιεκτικότητα του νερού σε άλατα. Τα φύλλα επηρεάστηκαν όταν η εφαρμογή αλατούχου νερού πραγματοποιήθηκε κατά την αναπαραγωγή και λιγότερο όταν πραγματοποιήθηκε στα υπόλοιπα δύο. Το σόργο φαίνεται ότι είναι πιο ευαίσθητο στο στάδιο της βλάστησης και ίσως να επηρεάζουν στη συνέχεια τη διαφοροποίηση της ταξιανθίας αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητο στο στάδιο της ωρίμανσης. Συμπερασματικά, το σόργο μπορεί να αρδεύεται με υποβαθμισμένης ποιότητας νερό μετά την άνθιση, χωρίς να επηρεάζεται η παραγωγή, αλλά κατά το βλαστικό και αναπαραγωγικό στάδιο θα πρέπει να αρδεύεται με καλής ποιότητας νερό (Maas et al., 1986).

2.6.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟ ΣΟΡΓΟ

Όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για νερό, τα επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα αποτελούν μια εναλλακτική πηγή αρδευτικού νερού.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές ερευνητικές προσπάθειες σχετικά με τα επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Ειδικότερα, στην Ελλάδα το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής έχει ασχοληθεί συστηματικά με την προοπτική τα επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική πηγή αρδευτικού νερού. Από τις διαχρονικές έρευνες έχει προκύψει ότι το ύψος των

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

φυτών του σόργου (ινώδους και γλυκού) και η παραγωγή ξηρής βιομάζας δεν επηρεάζονται σημαντικά από την εφαρμογή επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων με τη μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την άρδευση με καθαρό νερό. Ωστόσο, σημαντική είναι η εξοικονόμηση καθαρού νερού η οποία κυμαίνεται μεταξύ 23 και 38% ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες κάθε έτους. Από τις ίδιες έρευνες δεν διαπιστώθηκαν προβλήματα τοξικότητας στην καλλιέργεια αλλά ούτε και μειωμένη ομοιομορφία άρδευσης (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2006α,γ, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2006b, 2007b, 2009c).

2.7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στα προηγούμενα πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση δημοσιευμένων εργασιών για την στάγδην άρδευση για 21 καλλιέργειες και για την καλλιέργεια του σόργου.

Από την πλευρά των μεθόδων άρδευσης, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε δημοσιεύσεις που αναφέρονταν στη στάγδην άρδευση και ειδικότερα στην υπόγεια στάγδην άρδευση. Έγινε αναφορά:

- σε ιστορικά στοιχεία, στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου,
- σε στοιχεία που αφορούν το βάθος τοποθέτησης, την ισαποχή των αγωγών εφαρμογής και τη συχνότητα άρδευσης,
- στην επίδραση των δόσεων άρδευσης στην καλλιέργεια,
- στην επίδραση της καταλληλότητας νερού και την εφαρμογή χημικών ουσιών,
- στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και διαχείριση,
- στην ομοιομορφία και αποδοτικότητα χρήσης νερού και
- στη σύγκριση με άλλες μεθόδους άρδευσης και την οικονομικότητά της.

Από την πλευρά της καλλιέργειας το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε δημοσιεύσεις που αναφέρονταν στο σόργο. Έγινε αναφορά:

- σε γενικά στοιχεία που αφορούν το φυτό σόργο,
- σε κλιματικές και εδαφολογικές απαιτήσεις,
- σε καλλιεργητικές πρακτικές,
- στα στάδια ανάπτυξης του φυτού,
- σε προσβολές από ασθένειες και έντομα και
- στην επίδραση της άρδευσης στο σόργο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Τέλος ιδιαίτερη αναφορά έγινε σε δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών στην στάγδην άρδευση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο}

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Α. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διερεύνηση των επιδράσεων της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη, παραγωγικότητα και οικονομικότητα του ενεργειακού φυτού σόργου πραγματοποιήθηκε επί τρία συνεχή έτη. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο φυτό διότι:

- είναι από τα πλέον παραγωγικά φυτά σε χλωρή και ξηρή βιομάζα ακόμη και όταν εφαρμόζονται τεχνικές μειωμένων εισροών (ανήκει στα C_4 φυτά),
- είναι φυτό που ανταποκρίνεται στις μεταβολές της δόσης άρδευσης,
- απαιτεί καλλιεργητικές εργασίες και εξοπλισμό όμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στην καλλιέργεια του καλαμποκιού.

Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν συστήματα επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κλιματικών και εδαφικών παραμέτρων καθώς και δειγματοληψίες φυτικού υλικού σε πειραματικό αγρό.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις καλλιεργητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν, στο σχεδιασμό του πειράματος, στις παραμέτρους και στις μεταβλητές που απαιτείται να μετρηθούν για την αξιολόγηση της άρδευσης. Περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες από τις οποίες προέρχονται οι μετρήσεις των παραμέτρων και μεταβλητών αυτών. Περιγράφονται τα συστήματα και οι τεχνικές άρδευσης των πειραματικών τεμαχίων. Γίνεται αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των εδαφικών παραμέτρων, των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας και τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στον πειραματικό αγρό (Εικόνα. 3.1) του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίνου (39°23' Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος, 22°45' Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος, 70m υψόμετρο από την επιφάνειας της θάλασσας), συνολικής έκτασης 2190m^2 (30m x 73m), κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων 2007, 2008 και 2009.

Εικόνα 3.1: Ο πειραματικός αγρός πριν τη χάραξη των πειραματικών τεμαχίων.

3.2.1. ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Σύμφωνα με εδαφολογική μελέτη που έγινε, το πείραμα εγκαταστάθηκε σε έδαφος καλά στραγγιζόμενο που ανήκει στην υπό-ομάδα των Typic Xerorthent. Το έδαφος ταξινομήθηκε στα λεγόμενα Entisols. Σε όλο το βάθος της τομής υπερισχύουν τα κλάσματα της άμμου και η κοκκομετρική σύσταση βρίσκεται μεταξύ μέσης έως μετρίως χονδρόκοκκης ή μετρίως λεπτόκοκκης, με υφή πηλώδη έως αμμοπηλώδη ή αργιλοπηλώδη (Μήτσιος κ.ά., 2000).

Τα εδάφη αυτού του τύπου, σε όλο τους το βάθος, είναι συνήθως πλούσια σε ανθρακικά άλατα αλλά σε επίπεδα κατώτερα των απαγορευτικών για τις καλλιέργειες. Η οργανική ουσία βρίσκεται σε μέτρια έως χαμηλά επίπεδα και μειώνεται ακανόνιστα με το βάθος. Είναι εδάφη μετρίως αλκαλικά με την τιμή του pH να κυμαίνεται μεταξύ 7,7-8,1. Η Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) είναι μέτρια έως υψηλή και τα επιμέρους κατιόντα Mg, K και Na βρίσκονται σε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ικανοποιητικά επίπεδα. Η διαθεσιμότητα των ιχνοστοιχείων Fe, Zn και Mn είναι χαμηλή ενώ του Cu υψηλή αντίστοιχα. Ο διαθέσιμος φώσφορος βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Γενικά, το επίπεδο διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων χαρακτηρίζεται ικανοποιητικό έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη υψηλών αποδόσεων ακόμη και με μηδενική λίπανση (Μήτσιος κ.ά., 2000).

Η κατάσταση της υδρομορφίας τους είναι καλή έως άριστη. Παρουσιάζουν υπερβολική έως άριστη αποστράγγιση ενώ το πετρώδες και η όχι καλά αναπτυγμένη δομή, δημιουργούν ένα καλό πορώδες αποτελούμενο από μια ποικιλία πόρων ως προς το μέγεθος και το σχήμα τους. Έτσι, εξασφαλίζεται ικανοποιητικός αερισμός και συγκράτηση νερού στο ριζόστρωμα των φυτών (Μήτσιος κ.ά., 2000).

Στο Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους του αγρού.

Πίνακας 3.1: Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους στην εδαφοτομή P_1

Βάθος (cm)		0-34	34-62
Οργανική ουσία εδάφους g/100g		1,10	1,07
$CaCO_3$ %		5,00	14,50
pH 1:1		7,90	8,10
P-Olsen ppm		20,00	9,00
Ανταλλάξιμα κατιόντα εδάφους me/100g	K	0,27	0,38
	Na	0,07	0,15
	Ca	25,50	23,70
	Mg	6,16	8,54
C.E.C. me/100g εδάφους		32,00	32,80
Ιχνοστοιχεία ppm	Fe	4,50	6,40
	Cu	2,82	2,32
	Zn	0,80	0,38
	Mn	6,80	3,40

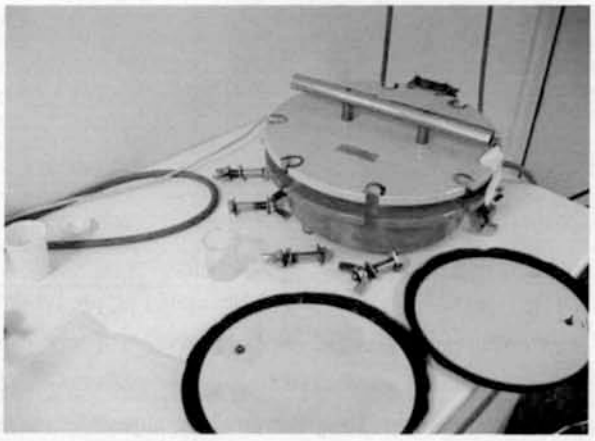
Εδαφοτομή P_1, Τάξη : Inceptisol, Υποομάδα : typic xerorthent

Για την ορθή επιλογή του εύρους άρδευσης και τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης απαιτείται να είναι γνωστές υδροδυναμικές παράμετροι του εδάφους (υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης και η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους). Για το σκοπό αυτό συλλέχθηκαν δείγματα αδιατάρακτου εδάφους από κάθε επανάληψη από δύο διαφορετικά βάθη (0-30cm, 30-60cm) με την χρήση ειδικού εδαφολήπτη αδιατάρακτου δείγματος, ο οποίος αποτελείται από μεταλλικούς κυλίνδρους διαμέτρου 5cm και ύψους 5cm. Έτσι, ο συνολικός αριθμός δειγμάτων ήταν 56. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάθε δείγμα να αντιστοιχεί σε μία επανάληψη και η πορεία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή των δειγμάτων ήταν σε τεθλασμένη γραμμή κατά μήκος του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

πειραματικού αγρού. Ακολουθήθηκε η συγκεκριμένη πορεία συλλογής των δειγμάτων για να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα να μείνει εκτός δειγματοληψίας κάποιο σημείο του αγρού όπου πιθανώς να υπήρχε ανομοιομορφία στο έδαφος (Benjamin, 1992). Ωστόσο, για τη διαδικασία δειγματοληψίας έγινε η παραδοχή ότι η συγκεκριμένη έκταση του αγροκτήματος ήταν ομογενής λόγω της περιορισμένης έκτασης του πειραματικού αγρού αλλά και παλαιότερης εδαφολογικής μελέτης, σύμφωνα με την οποία η έκταση αυτή εντάσσεται σε ευρύτερη εδαφολογική ζώνη του αγροκτήματος (Μήτσιος κ.ά., 2000).

Ο προσδιορισμός της ποσότητας νερού που συγκρατεί το συγκεκριμένο έδαφος στην υδατοϊκανότητα έγινε με την εφαρμογή της τεχνικής της σταδιακής αφαίρεσης νερού από αδιατάρακτα δείγματα εδάφους. Ως υδατοϊκανότητα ορίζεται η υγρασία που συγκρατεί ένα βαθύ, ομοιόμορφο και καλά στραγγιζόμενο έδαφος μετά την απομάκρυνση του ελεύθερου νερού (Παπαζαφειρίου, 1994). Στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με την συσκευή δίσκου πιέσεως.



Εικόνα 3.2: Συσκευή Richards και οι δίσκοι πιέσεως 1Atm και 15Atm.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ένα μικρό δείγμα κορεσμένου, με νερό, εδάφους τοποθετείται πάνω σε πορώδη κεραμικό δίσκο, ο οποίος είναι κορεσμένος με νερό επίσης, και καλύπτεται αεροστεγώς με μεταλλικό κάλυμμα. Ο χώρος κάτω από τον δίσκο βρίσκεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα ενώ στο χώρο που βρίσκεται πάνω από τον δίσκο εφαρμόζεται αέρας υπό πίεση. Η συσκευή ρυθμίζεται

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κατάλληλα ώστε η διαφορά πίεσης μεταξύ του πάνω και του κάτω από το δίσκο χώρου να ισούται με την τάση που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα του εδάφους που εξετάζεται. Το δείγμα παραμένει για ορισμένο χρόνο στη συσκευή και στη συνέχεια προσδιορίζεται η υδατοϊκανότητα από τη διαφορά βάρους του δείγματος πριν και μετά την εφαρμογή του αέρα υπό πίεση. Η πίεση που εφαρμόζεται συνήθως κυμαίνεται από 0,05-1,0Atm και η διάρκεια παραμονής του δείγματος στην συσκευή είναι περίπου 24h. Με τον ίδιο τρόπο προσδιορίστηκε και η ποσότητα νερού που συγκρατεί το ίδιο έδαφος στο σημείο μόνιμης μάρανσης (σημείο στο οποίο το έδαφος συγκρατεί ποσότητα νερού η οποία όμως δεν είναι διαθέσιμη για την κάλυψη των αναγκών των φυτών). Σήμερα, ως αντιπροσωπευτική του σημείου μόνιμης μάρανσης όλων των εδαφών, έχει γίνει αποδεκτή η τάση των 15Atm (Παπαζαφειρίου, 1994).

Η κατά βάρος ποσότητα νερού που συγκρατεί το έδαφος στην υδατοϊκανότητα και στο σημείο μόνιμης μάρανσης προσδιορίστηκε με τη θερμοβαρυμετρική μέθοδο. Η κατ' όγκο ποσότητα νερού που συγκρατεί το έδαφος είναι το γινόμενο της αντίστοιχης κατά βάρος ποσότητας επί τη φαινόμενη πυκνότητά του. Σημειώνεται ότι η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους υπολογίστηκε ως το πηλίκο του ξηρού βάρους του αρχικού δείγματος εδάφους, όπως αυτό συλλέχθηκε στους ειδικούς κυλίνδρους δειγματοληψίας αδιατάρακτου δείγματος, προς τον όγκο του μεταλλικού δοχείου δειγματοληψίας. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων καθώς και η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (Available Soil Moisture, ASM) φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Τύπος και υδροδυναμικές παράμετροι του εδάφους (μέσες τιμές).

Α/Α	Βάθος (cm)	0-30	30-60
1	**Τύπος Εδάφους**	Loam	Sandy Clay Loam
2	**Φαινόμενη Πυκνότητα (P_b) gr/cm^3**	1.62	1.42
3	**Υδατοϊκανότητα (ΥΔ) %κ.β.**	21.18	21.87
4	**Υδατοϊκανότητα (ΥΔ) %κ.ο. (ΥΔ%κ.ο.=ΥΔ%κ.β. x P_b)**	34.30	31.05
5	**Σημείο Μόνιμης Μάρανσης (ΣΜΜ) %κ.β.**	11.98	12.39
6	**Σημείο Μόνιμης Μάρανσης (ΣΜΜ) %κ.ο. (ΣΜΜ%κ.ο.=ΣΜΜ%κ.β. x P_b)**	19.41	17.59
7	**Διαθέσιμη Υγρασία Εδάφους (ASM) m/m [ASM=(ΥΔ-ΣΜΜ) x Βάθος Ριζοστρώματος x 0,01]**	148.90	134.60

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, K_s, αποτελεί μια φυσική παράμετρο του εδάφους η τιμή της οποίας θα πρέπει να είναι γνωστή για την κατάλληλη επιλογή του συστήματος άρδευσης και επομένως την επιλογή της βέλτιστης διάρκειας άρδευσης. Για το σκοπό αυτό προσδιορίστηκε στον αγρό η K_s με το υδροπερατόμετρο Guelph της Soil Moisture Equipment (Reynolds and Elrick, 1985). Μετρήσεις της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας με το υδροπερατόμετρο Guelph έχουν πραγματοποιηθεί από τους Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α. (1994), Τζιμόπουλο κ.α. (1996), (2000). Παράλληλα έγινε εκτίμηση της τιμής της K_s, σε δύο διαφορετικά βάθη (0-30cm και 30-60cm), με την εφαρμογή του λογισμικού προγράμματος HYDRUS (2D/3D) version 1.02 (Šimůnek et al., 2007). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε βάθος 15cm και 45cm ενώ για την εφαρμογή του προγράμματος HYDRUS (2D/3D) απαιτήθηκε η γνώση της χημικής δομής του εδάφους καθώς και οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας και της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους στην υδατοϊκανότητα και στο σημείο μόνιμης μάρανσης. Στον Πίνακα 3.3 δίνονται οι τιμές της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας που μετρήθηκαν στον αγρό με το υδροπερατόμετρο Guelph καθώς και οι εκτιμήσεις από την εφαρμογή του προγράμματος HYDRUS (2D/3D).

Πίνακας 3.3: Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα.

Α/Α	Βάθος (cm)	0-30	30-60
1	**Τύπος Εδάφους**	Loam	Sandy Clay Loam
2	**Φαινόμενη Πυκνότητα (P_b), gr/cm^3**	1.62	1.42
3	**Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα K_s, (cm/h) (Μετρημένη με υδροπερατόμετρο Guelph)**	0,64	0,12
4	**Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα K_s, (cm/h) (Εκτίμηση με εφαρμογή του HYDRUS 2D/3D**	0,62	0,10

3.3. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η σωστή χάραξη των πειραματικών τεμαχίων προϋποθέτει την καλή κατεργασία του εδάφους έτσι ώστε αυτό να είναι ψιλοχωματισμένο και με ομοιόμορφη κλίση. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαιτούμενες καλλιεργητικές εργασίες για την καλλιέργεια του αραβόσιτου, αφενός μεν σύμφωνα με την γενική καλλιεργητική πρακτική μειωμένης κατεργασίας και αφετέρου δε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σύμφωνα με τους κώδικες ορθής γεωργικής πρακτικής (Σφήκας, 1988, Υπουργική Απόφαση 125347/568/2004 ΦΕΚ 142/Β/29.1.2004).

Συγκεκριμένα, κάθε χρόνο, μετά τη συγκομιδή της καλλιέργειας της προηγούμενης καλλιεργητικής περιόδου, καταστρέφονταν τα στελέχη της, με τη χρήση στελεχοκοπτικού μηχανήματος, και τα υπολείμματα ενσωματώνονταν στο έδαφος. Νωρίς την ερχόμενη άνοιξη πραγματοποιούνταν κατεργασία με βαρύ καλλιεργητή για την αναμόχλευση του εδάφους και την καταστροφή τυχόν χειμερινών ζιζανίων ενώ περίπου ένα μήνα αργότερα ακολουθούσε ελαφριά κατεργασία του εδάφους, με ελαφρό καλλιεργητή, για τον ψιλοχωματισμό του εδάφους και την καταστροφή τυχόν ανοιξιάτικων ζιζανίων που είχαν στο μεταξύ αναπτυχθεί. Η τελική κατεργασία πραγματοποιούνταν με σβολοκοπτικό μηχάνημα για την τελική διαμόρφωση της σποροκλίνης.

Ακολουθούσε η σπορά της καλλιέργειας. Κάθε χρόνο η σπορά του σόργου πραγματοποιούνταν κατά το δεύτερο δεκαήμερο του Μαΐου με πνευματική σπαρτική μηχανή τεσσάρων μονάδων. Χρησιμοποιήθηκε το υβρίδιο H132. Η σπορά γίνονταν σε βάθος 2cm και σε αποστάσεις 80cm μεταξύ των γραμμών και 12cm επί των γραμμών. Κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου δεν πραγματοποιήθηκε κανενός είδους χημική επέμβαση, εκτός από μία αυστηρά κατευθυνόμενη επέμβαση με τη ζιζανιοκτόνο ουσία glyphosate ενώ πραγματοποιήθηκαν τρία σκαλίσματα με το χέρι μέχρι τα φυτά να φτάσουν σε ύψος τα 60cm. Κατά τη δεύτερη και τρίτη καλλιεργητική περίοδο, αμέσως μετά την σπορά πραγματοποιήθηκε χημική ζιζανιοκτονία με εφαρμογή της ζιζανιοκτόνου ουσίας atrazine και δόση 200cm^3/στρ. ενώ πραγματοποιήθηκε μόνο ένα σκάλισμα με το χέρι όταν τα φυτά βρίσκονταν σε ύψος 50cm την καλλιεργητική περίοδο 2008 και δύο σκαλίσματα την όταν τα φυτά είχαν ύψος 25cm και 50cm την καλλιεργητική περίοδο 2009. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή χημικής ζιζανιοκτονίας έγινε στο πλαίσιο μελέτης της οικονομικότητας της καλλιέργειας τόσο σε συνθήκες μηδενικών χημικών εισροών όσο και σε συνθήκες εφαρμογής των ελάχιστων δυνατών χημικών εισροών. Τέλος κατά τη δεύτερη και τρίτη καλλιεργητική περίοδο πραγματοποιήθηκε προληπτική χημική επέμβαση με τη μυκητοκτόνο ουσία carbendazim για την προστασία της καλλιέργειας από την μυκητολογική ασθένεια ελμινθοσπορίαση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

3.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας της σπορόκλινης ακολουθούσε η χάραξη του πειραματικού αγρού. Η χάραξη πραγματοποιούνταν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται δύο βασικές προϋποθέσεις. Πρώτον, τα 28 πειραματικά τεμάχια να έχουν την ίδια ακριβώς έκταση και να απέχουν από το γειτονικό πειραματικό τεμάχιο απόσταση ίση με 1,25m. Δεύτερον, τα τεμάχια που επρόκειτο να αρδευτούν με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης έπρεπε να καταλαμβάνουν έδαφος ακριβώς πάνω από τους θαμμένους αγωγούς εφαρμογής και ταυτόχρονα η έκτασή τους να είναι τέτοια ώστε κατά τη σπορά της καλλιέργειας οι γραμμές σποράς να βρίσκονται εκατέρωθεν των υπόγειων σταλακτηφόρων σωλήνων και να ισαπέχουν από αυτούς.

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν αυτό των Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων με επτά μεταχειρίσεις (τρεις υπόγειες και τέσσερις επιφανειακές) και τέσσερις επαναλήψεις για την κάθε μεταχείριση. Η τυχαιοποίηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την εφαρμογή πινάκων τυχαιοποιημένων διψήφιων αριθμών (Φασούλας, 1991, Φωτιάδης, 1996). Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόσθηκαν ήταν:

I. **Υ100** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονται από την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ), η οποία υπολογίζεται με τη χρήση εξατμισίμετρου τύπου Α. Εύρος άρδευσης 2 ημέρες.

II. **Υ70** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 70% της ΕΤ. Εύρος άρδευσης και υπολογισμός της ΕΤ όμοιος με την Υ100ΕΤ.

III. **Υ50** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 50% της ΕΤ. Εύρος άρδευσης και υπολογισμός της ΕΤ όμοιος με την Υ100ΕΤ.

IV. **Ε100** (Μάρτυρας): Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% της ΕΤ. Εύρος άρδευσης και υπολογισμός της ΕΤ όμοιος με την Υ100ΕΤ.

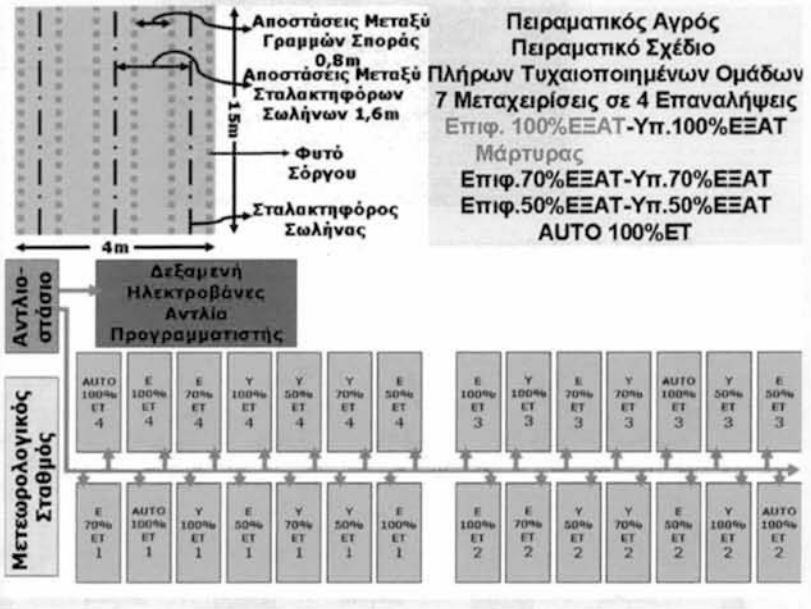
V. **Ε70** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 70% της ΕΤ. Εύρος άρδευσης και υπολογισμός της ΕΤ όμοιος με την Υ100ΕΤ.

VI. **Ε50** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 50% της ΕΤ. Εύρος άρδευσης και υπολογισμός της ΕΤ όμοιος με την Υ100ΕΤ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

VII. **A100** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονται από την διακύμανση της υγρασίας εδάφους. Για την υλοποίηση της άρδευσης, στη συγκεκριμένη μεταχείριση, χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας καταγραφής της εδαφικής υγρασίας.

Στην Εικόνα 3.3 απεικονίζεται η διάταξη των πειραματικών τεμαχίων επί του πειραματικού αγρού. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 12,5m μήκος (παράλληλα στις γραμμές σποράς) και 4m πλάτος, δηλαδή εμβαδόν 50m^2 και περιελάμβανε έξι γραμμές φυτών. Οι διάφορες μετρήσεις των χαρακτηριστικών του φυτού (ύψος, δείκτης φυλλικής επιφάνειας, χλωρή και ξηρή βιομάζα) πραγματοποιούνταν σε φυτά που κάλυπταν τις δύο μεσαίες γραμμές σποράς έτσι ώστε να αποφεύγεται τυχόν αλληλεπίδραση με γειτονικά πειραματικά τεμάχια.



Εικόνα 3.3: Διάταξη πειραματικών τεμαχίων

3.5. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

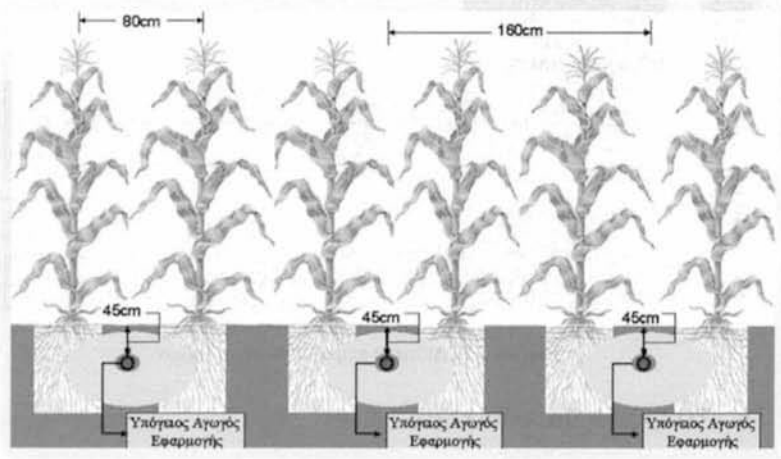
3.5.1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, εκτός των άλλων, αφορούσε και στην μελέτη της επίδρασης της υπόγειας στάγδην άρδευσης στα παραγωγικά

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

χαρακτηριστικά του φυτού σόργου. Για το σκοπό αυτό πριν την έναρξη της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του συστήματος υπόγειας στάγδην άρδευσης. Οι σταλακτηφόροι αγωγοί τοποθετήθηκαν σε βάθος 45cm από την επιφάνεια του εδάφους με ειδικό υπεδαφοθέτη όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4 ενώ στην Εικόνα 3.5 απεικονίζεται γραφικά η θέση των σταλακτηφόρων αγωγών σε κάθε πειραματικό τεμάχιο.

Εικόνα 3.4: Τοποθέτηση υπόγειου συστήματος άρδευσης με υπεδαφοθέτη

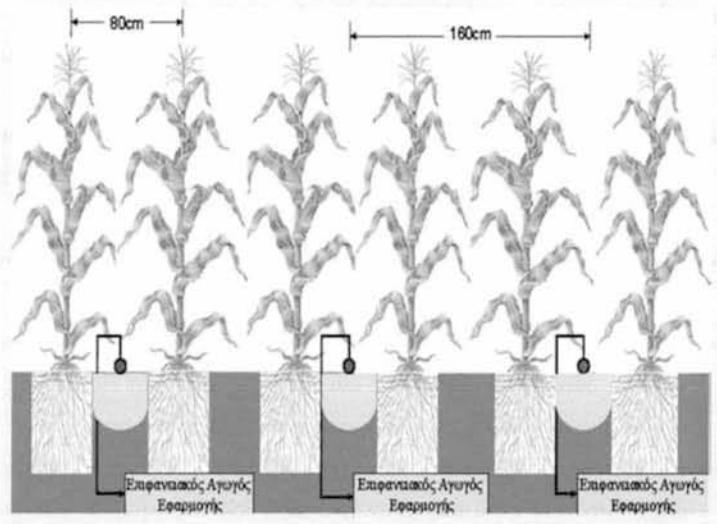


Εικόνα 3.5: Γραφική απεικόνιση της διάταξης υπόγειας στάγδην άρδευσης

Οι σταλακτηφόροι ισαπήχαν απόσταση ίση με 160cm τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό σύστημα άρδευσης. Η επιλογή της συγκεκριμένης απόστασης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

έγινε με γνώμονα την ικανοποίηση των αναγκών άρδευσης καλλιεργειών που σπέρνονται σε αποστάσεις 80cm μεταξύ των γραμμών σποράς. Η εγκατάσταση του επιφανειακού συστήματος άρδευσης πραγματοποιούνταν όταν τα φυτά βρίσκονταν στο στάδιο των πέντε φύλλων και η γραφική απεικόνιση του συστήματος σε κάθε πειραματικό τεμάχιο φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Από τις Εικόνες 3.5 και 3.6 γίνεται αντιληπτό ότι τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό σύστημα άρδευσης δύο διαδοχικοί αγωγοί εφαρμογής περιελάμβαναν δύο γραμμές φυτών.



Εικόνα 3.6: Γραφική απεικόνιση της διάταξης επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

Αναλυτικά, σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός της Α100, το σύστημα άρδευσης αποτελούνταν από τρεις διαφορετικούς τύπους σταλακτηφόρων αγωγών. Ο κύριος αγωγός μεταφοράς νερού ήταν κατασκευασμένος από πολυαιθυλένιο διαμέτρου 32mm και εξυπηρετούσε την μεταφορά του νερού από δεξαμενή χωρητικότητας 50m^3 έως την υδροληψία του πειραματικού τεμαχίου. Η δεξαμενή τροφοδοτούνταν με νερό από παρακείμενη γεώτρηση παροχής 35m^3/h. Κάθε κύριος αγωγός τροφοδοτούσε δύο δευτερεύοντες αγωγούς μεταφοράς κατασκευασμένους από το ίδιο υλικό και διαμέτρου 25mm από τους οποίους ο ένας τροφοδοτούσε δώδεκα επιφανειακούς αγωγούς εφαρμογής, πολυαιθυλενίου, διαμέτρου 20mm (τρεις για κάθε επανάληψη) και ο δεύτερος δώδεκα υπόγειους αγωγούς εφαρμογής, αντίστοιχα. Μεταξύ του δευτερεύοντα αγωγού τροφοδοσίας και των αγωγών εφαρμογής παρεμβάλλονταν υδρομετρητής για την καταγραφή της ποσότητας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

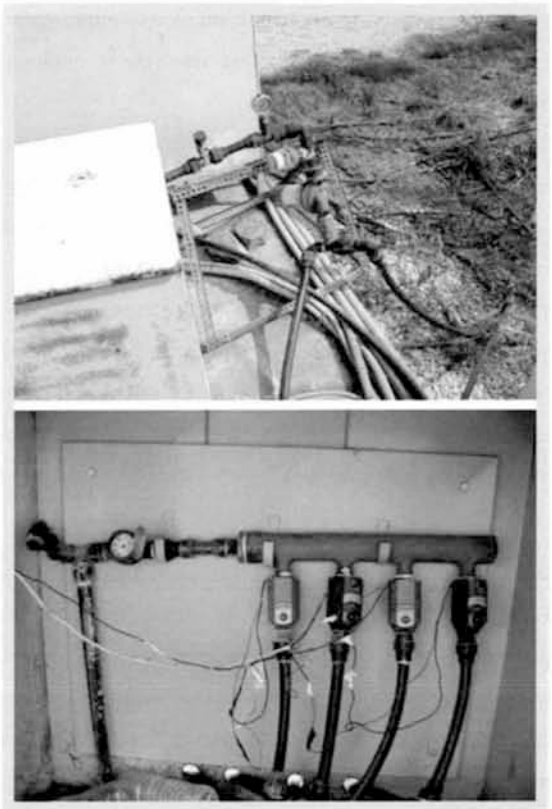
νερού που χορηγούνταν σε κάθε άρδευση. Κάθε αγωγός εφαρμογής είχε μήκος 12,5m και περιελάμβανε σταλακτήρες αυτορυθμιζόμενους και αυτόκαθαριζόμενους που εξασφάλιζαν ρυθμό εφαρμογής του νερού άρδευσης ίσο με 2,3L/h για εύρος πίεσης από 0,5-3,0Atm, οι οποίοι ισαπήχαν 80cm μεταξύ τους επί του αγωγού εφαρμογής. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 3 κύριοι και 6 δευτερεύοντες αγωγοί τροφοδοσίας ενώ ο αριθμός των αγωγών εφαρμογής ήταν 72.

Η κεφαλή του συστήματος περιελάμβανε όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό για την ορθή εφαρμογή της στάγδην άρδευσης. Αυτός αποτελούνταν από:

- ένα αντλητικό συγκρότημα με δυνατότητα άντλησης νερού από βάθος 3m το οποίο εξασφάλιζε σταθερή πίεση 2,5Atm ,
- ένα φίλτρο δίσκων 200mesh (Tech filter) εμποτισμένων με την ζιζανιοκτόνο ουσία trifluralin για την αποφυγή εισχώρησης ριζών στην οπή του σταλάκτη του υπόγειου συστήματος άρδευσης,
- δύο ειδικά μανόμετρα τοποθετημένα πριν και μετά το φίλτρο για τον έλεγχο τυχόν έμφραξής του,
- μία ειδική βαλβίδα αντεπιστροφής για την αποφυγή φαινομένων αναρρόφησης κατά τη διακοπή της άρδευσης και επομένως αποφυγή εισρόφησης φερτών υλικών στους σταλάκτες του υπόγειου συστήματος άρδευσης,
- ένα κεντρικό υδρομετρητή για τον έλεγχο, αφενός, της ποσότητας νερού που διέρχονταν από αυτό και κατέληγε στους κύριους αγωγούς μεταφοράς και αφετέρου τη σύγκριση της ποσότητας αυτής με την ποσότητα νερού που κατέγραφε καθένας από τους υδρομετρητές στην είσοδο κάθε πειραματικού τεμαχίου,
- ένα δεύτερο φίλτρο συγκράτησης φερτών υλικών τοποθετημένο πριν από τις ηλεκτροβάνες,
- τρεις ηλεκτροβάνες 9V συνεχούς ρεύματος και ένα προγραμματιστή άρδευσης.

Κάθε μία από τις ηλεκτροβάνες ελέγχονταν από προγραμματιστή άρδευσης. Ο προγραμματιστής έθετε σε λειτουργία το αντλητικό συγκρότημα και ρύθμιζε την διαδοχική λειτουργία της κάθε ηλεκτροβάνας. Η κάθε ηλεκτροβάνα συνδέονταν με τον κύριο αγωγό μεταφοράς διαμέτρου 32mm κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ίδια ηλεκτροβάνα να ελέγχει την έναρξη και λήξη της άρδευσης σε μεταχειρίσεις που δέχονταν την ίδια δόση άρδευσης. Η Εικόνα 3.7 παρουσιάζει τη διάταξη της κεφαλής ελέγχου των συστημάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 3.7: Κεφαλή ελέγχου με το φίλτρο δίσκων, τη βαλβίδα εκτόνωσης, τις ηλεκτροβάνες τροφοδοσίας των μεταχειρίσεων και το κεντρικό υδρόμετρο.

Κάθε χρόνο πραγματοποιούνταν έλεγχος του συστήματος άρδευσης. Κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση καινούριου φίλτρου δίσκων το οποίο ελέγχονταν κάθε μήνα για τυχόν υψηλή συγκέντρωση αποθέσεων αλάτων και πραγματοποιήθηκαν δύο καθαρισμοί. Τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο πραγματοποιήθηκαν τρεις καθαρισμοί ενώ την τρίτη καλλιεργητική περίοδο αντικαταστάθηκε ολόκληρο το φίλτρο δίσκων γιατί η διάρκεια ζωής των δίσκων είναι δύο έτη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ορθής λειτουργίας του, και πραγματοποιήθηκαν δύο καθαρισμοί. Ο τακτικός έλεγχος των αγωγών μεταφοράς, τροφοδοσίας και εφαρμογής περιελάμβανε:

- παρατηρήσεις της επιφάνειας του αγρού για αναγνώριση πολύ ξηρών ή πολύ υγρών περιοχών κατά την επιφανειακή άρδευση,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- παρατηρήσεις της επιφάνειας του αγρού για αναγνώριση υγρών περιοχών κατά την υπόγεια άρδευση, γεγονός που θα υποδήλωνε διαρροή του υπόγειου συστήματος άρδευσης,
- παρατήρηση των υδρομετρητών και σύγκριση της καταγεγραμμένης ποσότητας νερού που χορηγήθηκε με την ποσότητα που είχε σχεδιαστεί να χορηγηθεί. Μεγάλες διαφορές στις ποσότητες αυτές υποδήλωνε έμφραξη (χαμηλότερη παροχή) ή διαρροή (υψηλότερη παροχή),
- εφαρμογή του κριτηρίου Christiansen σε κάθε επιφανειακό και υπόγειο αγωγό εφαρμογής. Ο έλεγχος πραγματοποιούνταν με ειδικό μανόμετρο με το οποίο μετρούνταν η πίεση λειτουργίας του πρώτου και του τελευταίου σταλάκτη. Όταν η διαφορά στην πίεση λειτουργίας τους ήταν <20% τότε ο αγωγός εφαρμογής λειτουργούσε κανονικά.

3.5.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΥΦΥΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Για την άρδευση της μεταχείρισης Α100 χρησιμοποιήθηκε σύστημα ευφυούς άρδευσης. Το σύστημα περιελάμβανε τους ίδιους τρεις τύπους αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, με τη διαφορά ότι ο κύριος αγωγός μεταφοράς τροφοδοτούσε έναν δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας και αυτός δώδεκα επιφανειακούς αγωγούς εφαρμογής (τρεις για κάθε επανάληψη). Η συγκεκριμένη μεταχείριση αρδεύονταν από δεύτερη δεξαμενή ίδιας χωρητικότητας με την πρώτη, η οποία τροφοδοτούνταν με νερό από την ίδια γεώτρηση όπως και η πρώτη. Η δεύτερη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε γιατί ήταν εφοδιασμένη με ειδικό σύστημα αντλίας και πιεστικού δοχείου που εξασφάλιζε συνεχή παροχή νερού στο σύστημα ολόκληρο το 24ωρο.

Η κεφαλή ελέγχου της συγκεκριμένης μεταχείρισης είχε παρόμοια διάταξη με την κεφαλή ελέγχου των άλλων έξι μεταχειρίσεων. Περιελάμβανε ότι και η κεφαλή ελέγχου των μεταχειρίσεων αυτών, με τη διαφορά ότι η ηλεκτροβάνα που χρησιμοποιήθηκε ήταν εναλλασσόμενου ρεύματος 24V και ελέγχονταν από αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους συνδεδεμένο με data logger αντί για προγραμματιστή άρδευσης. Για την κατακράτηση των φερτών υλικών που τυχόν μεταφέρονταν με τον αγωγό μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε φίλτρο σήτας αντί για φίλτρο δίσκων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

3.6. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.6.1. ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ

Η ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόζονταν σε κάθε άρδευση ελέγχονταν και καταγράφονταν μέσω μηχανικών υδρομετρητών. Χρησιμοποιήθηκαν 4 υδρομετρητές σε κάθε μεταχείριση, δηλαδή ένας για κάθε επανάληψη, και συνολικά 28 για το σύνολο των μεταχειρίσεων και επαναλήψεων. Οι υδρομετρητές συνδέονταν στον δευτερεύοντα αγωγό μεταφοράς στο σημείο υδροληψίας της κάθε επανάληψης. Η καταγραφή των ποσοτήτων νερού που χορηγούνταν σε κάθε επανάληψη γίνονταν πριν και μετά το τέλος της κάθε άρδευσης ενώ πραγματοποιούνταν σύγκριση της συνολικής ποσότητας νερού που κατέγραψαν όλοι οι υδρομετρητές με την ποσότητα που κατέγραψε ο κεντρικός υδρομετρητής στην κεφαλή ελέγχου.

Ο τακτικός έλεγχος των υδρομετρητών εξασφάλιζε την έγκαιρη διαπίστωση και αποκατάσταση τυχόν δυσλειτουργιών ή αστοχίας του συστήματος. Με αυτή τη μέθοδο ελέγχονταν τόσο η ομοιομορφία εφαρμογής του νερού άρδευσης, κυρίως στο υπόγειο σύστημα, όσο και οι τυχόν αποκλίσεις από την επιθυμητή δόση άρδευσης.

3.6.2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Η μέτρηση της υγρασίας εδάφους και των μεταβολών της αποτελούν βασική παράμετρο των αρδεύσεων. Η εδαφική υγρασία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις μεθόδους άρδευσης που στοχεύουν στην διατήρησή της σε ένα ορισμένο εύρος τιμών καθορίζοντας το χρόνο και την ποσότητα νερού που θα εφαρμοστεί σε κάθε άρδευση.

Για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας έχουν χρησιμοποιηθεί άμεσες και έμμεσες μέθοδοι (Gardner et al., 1991). Οι άμεσες μέθοδοι απαιτούν τη λήψη δειγμάτων εδάφους στα οποία εφαρμόζονται χημικές τεχνικές ή τεχνικές θέρμανσης για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου νερού. Η κυριότερη μέθοδος από αυτές είναι η θερμοβαρυμετρική. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το εδαφικό δείγμα υφίσταται θέρμανση στους 105^{o}C έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος του (Gardner et al., 1991) και με διαδοχικές ζυγίσεις του βάρους του πριν και μετά την θέρμανση προσδιορίζεται η εδαφική υγρασία (Παπαζαφειρίου, 1994). Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των άμεσων μετρήσεων είναι τρία. Πρώτον είναι χρονοβόρες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μέθοδοι διότι απαιτούνται τουλάχιστον δύο ημέρες για την πραγματοποίησή τους. Δεύτερον η λήψη δείγματος διαταράσσει το έδαφος στο σημείο δειγματοληψίας και τρίτον απαιτείται λήψη πολλών δειγμάτων για να αποφεύγεται η χωρική παραλλακτικότητα. Ωστόσο, οι άμεσες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε πολλές περιπτώσεις και ειδικά στη βαθμονόμηση των έμμεσων μεθόδων λόγω της ακρίβειάς τους (Gardner et al., 1991).

Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της εδαφικής υγρασίας βασίζονται σε μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους που σχετίζονται με αυτή. Η μετρήσεις πραγματοποιούνται από αισθητήρες μόνιμα εγκατεστημένους στο έδαφος οι οποίοι συνδέονται με μονάδα μέτρησης, κάθε φορά που απαιτείται να γίνει καταγραφή της εδαφικής υγρασίας. Σε άλλες περιπτώσεις η μέτρηση γίνεται με φορητούς αισθητήρες που διεισδύουν απευθείας στο έδαφος ή σε ειδικούς προεγκατεστημένους σε αυτό σωλήνες. Οι έμμεσες μέθοδοι πλεονεκτούν έναντι των άμεσων μεθόδων διότι επιτρέπουν την καταγραφή της εδαφικής υγρασίας στο ίδιο σημείο σε διαδοχικές χρονικές περιόδους. Οι περισσότερο διαδεδομένες είναι η μέθοδος των νετρονίων, η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης και οι μέθοδοι της διηλεκτρικής σταθεράς. Μεταξύ των μεθόδων μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς συγκαταλέγεται και η μέθοδος T.D.R.

3.6.2.1 Η Μέθοδος T.D.R

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος μέτρησης ανάκλασης ηλεκτρομαγνητικού παλμού ή χρονικής ανακλασιμετρίας ή Time Domain Reflectometry. Είναι μια μη πυρηνική μέθοδος, γρήγορη και ανεξάρτητη από τον τύπο του εδάφους (Topp et al., 1980, Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.α., 1997).

Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για να διατρέξει ένας παλμός τάσης, υψηλής συχνότητας, το μήκος ενός βυθισμένου κυματοδηγού. Ο παλμός τάσης διανύει τους κυματοδηγούς και ανακλάται από τις άκρες τους. Ο όγκος του εδαφικού νερού προσδιορίζεται από το χρόνο, Δt, της επιστροφής του παλμού τάσης, ο οποίος συγκρίνεται με τον θεωρητικό χρόνο που απαιτείται για να διατρέξει ο ίδιος παλμός το απόλυτο κενό. (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 1997, Kalfountzos et al., 2002, 2003).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Παραλλαγή της μεθόδου T.D.R. αποτελεί η μέθοδος TRASE (Time Reflectometry Analysis of Signal Energy). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ταχύτητα με την οποία ο παλμός ηλεκτρισμού περνά μέσα από μια παράλληλη γραμμή εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά (Κ) του υλικού που περιβάλει τη γραμμή μετάβασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διηλεκτρική σταθερά τόσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα. Διηλεκτρική σταθερά ή επαγωγική ικανότητα ενός μονωτικού υλικού, Κ, ονομάζεται το πηλίκο της χωρητικότητας ενός πυκνωτή, οι οπλισμοί του οποίου χωρίζονται από το μονωτικό υλικό, προς την χωρητικότητα πυκνωτή ίδιων διαστάσεων, του οποίου οι οπλισμοί χωρίζονται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο χρόνος διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού και της διηλεκτρικής σταθεράς εξαρτάται από την αναλογία των τριών φάσεων του εδάφους (νερό, αέρας και στερεή κατάσταση). Η διηλεκτρική σταθερά του νερού κυμαίνεται μεταξύ 74 και 84 ανάλογα με τη θερμοκρασία ενώ στους 20°C η τιμή της είναι 80,2. Στην ίδια θερμοκρασία η αντίστοιχη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς των στερεών συστατικών του εδάφους και του αέρα είναι 3 – 5 και 1, αντίστοιχα. Η μεγάλη διαφορά της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού και των άλλων συστατικών του εδάφους την καθιστά ευαίσθητη στις μεταβολές της εδαφικής υγρασίας. Όταν ένας παλμός μικροκύματος περνά από μια γραμμή μετάβασης συμπεριφέρεται περίπου όπως μια δέσμη φωτός. Ασυνέχειες στη γραμμή μετάβασης και το περικλειόμενο υλικό προκαλεί ένα μέρος της ενέργειας του μικροκύματος να ανακλάται πίσω δια μέσω της γραμμής. Όταν ο παλμός φτάσει στο τέλος της γραμμής μεταβίβασης η υπολειπόμενη ενέργεια μέσα στον παλμό ανακλάται πίσω διαμέσου της γραμμής όπως ακριβώς μια δέσμη φωτός που περνά μέσα από ένα σωλήνα ανακλάται όταν στο τέλος του σωλήνα υπάρχει καθρέπτης.

Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν δυνατή τη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται έτσι ώστε ένας παλμός μικροκύματος να διατρέξει το γνωστό μήκος μιας γραμμής μετάβασης (κυματοδηγού, waveguide) τοποθετημένο στο έδαφος.

Βασιζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση οι Topp et al. (1980) πρότειναν την εμπειρική σχέση 3.1 για τον υπολογισμό της κατ' όγκο εδαφικής υγρασίας.

$$\Theta_v = -0{,}053 + 0{,}0292K_b - 0.00055K_b^2 + 0.0000043K_b^3 \qquad (3.1)$$

όπου: Θ_v είναι η κατ' όγκο εδαφική υγρασία (%κ.ο.),

K_b είναι η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η εμπειρική αυτή σχέση ισχύει για ευρύ φάσμα ανόργανων εδαφών και υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την εδαφική υγρασία. Όταν το έδαφος είναι απόλυτα ξηρό η K_b κυμαίνεται μεταξύ 2-4 ενώ όταν 25% της χωρητικότητας του εδάφους καταλαμβάνεται από νερό η K_b κυμαίνεται μεταξύ 11-12. Στις περιπτώσεις που η σχέση $\Theta_v - K_b$ δεν περιγράφεται με ακρίβεια τότε απαιτείται βαθμονόμηση.

Η μέθοδος T.D.R. έχει χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής και στον αγρό από τους Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.α. (1997), Sakellariou – Makrantonaki (1997), Kalfountzos et al. (2002), (2003).

3.6.2.2 Μετρήσεις Εδαφικής Υγρασίας με το Σύστημα Moisture Point

Οι μετρήσεις υγρασίας τόσο στο έδαφος όσο και σε άλλα πορώδη υλικά πραγματοποιούνται από ποικιλία συστημάτων T.D.R. Στην παρούσα έρευνα οι μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας σε όλες τις μεταχειρίσεις εκτός της A100 πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα Moisture Point και το σύστημα Envirosmart της εταιρείας SENTEK στη μεταχείριση A100. Το σύστημα Moisture Point χρησιμοποιήθηκε μόνο για τη λήψη μετρήσεων εδαφικής υγρασίας ενώ το σύστημα Envirosmart χρησιμοποιήθηκε τόσο για τη λήψη μετρήσεων όσο και για τον έλεγχο της άρδευσης στη μεταχείριση A100.

Το σύστημα Moisture Point αποτελείται από τρία επιμέρους λειτουργικά τμήματα. Το κύριο λειτουργικό τμήμα του συστήματος είναι η συσκευή T.D.R. η οποία περιλαμβάνει τον ενσωματωμένο επεξεργαστή και την οθόνη ανάγνωσης των μετρήσεων. Οι αισθητήρες τετραγωνικής διατομής αποτελούν το δεύτερο λειτουργικό τμήμα του συστήματος ενώ το τρίτο λειτουργικό τμήμα ήταν το καλώδιο σύνδεσης της συσκευής T.D.R. με τον αισθητήρα.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο τύπων. Διέφεραν μεταξύ τους ως προς το μήκος του αισθητήρα και επομένως και ως προς το βάθος των επιμέρους στρωμάτων του εδάφους στο οποίο κατέγραφαν την υγρασία. Ο ένας τύπος αισθητήρα είχε μήκος 120cm και κατέγραφε την εδαφική υγρασία σε 5 στρώματα εδάφους τα οποία είχαν εύρος 0-15cm, 15-30cm, 30-60cm, 60-90cm και 90-120cm. Ο δεύτερος τύπος αισθητήρα είχε μήκος 75cm και κατέγραφε την εδαφική υγρασία σε ίδιο αριθμό στρωμάτων εδάφους τα οποία όμως είχαν εύρος 0-15cm, 15-30cm, 30-45cm, 45-60cm και 60-75cm. Οι μετρήσεις εδαφικής υγρασίας φαίνονται στην

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

οθόνη ως ποσοστό %κ.ο. Η βαθμονόμηση του οργάνου έχει γίνει από τον κατασκευαστή. Την πρώτη καλλιεργητική περίοδο ο έλεγχος ακρίβειας των μετρήσεων τόσο του συστήματος Moisture Point όσο και του Envirosmart έγινε με τη λήψη δειγμάτων εδάφους από τα σημεία στα οποία ήταν εγκατεστημένοι οι αισθητήρες και από κάθε βάθος μέτρησης με την εφαρμογή της θερμοβαρυμετρικής μεθόδου. Από τις μετρήσεις προέκυψε εξίσωση συσχέτισης των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας μεταξύ των δύο συστημάτων. Τις άλλες δύο καλλιεργητικές περιόδους πραγματοποιούνταν σύγκριση των μετρήσεων που έδιναν οι αισθητήρες του συστήματος Moisture Point με αυτές από τον αισθητήρα του συστήματος Envirosmart κατά τη διάρκεια των αρδεύσεων με τεχνητή βροχή και πριν αρχίσει να εφαρμόζεται το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 7 αισθητήρες μέτρησης υγρασίας Moisture Point και ένας Envirosmart κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας. Από τους 7 Moisture Point αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν 5 μήκους 120cm στις μεταχειρίσεις A100, E100, Y100, E70 και Y70 ενώ στις μεταχειρίσεις E50 και Y50 χρησιμοποιήθηκε ο τύπος με το μικρότερο μήκος. Η επιλογή έγινε με αυτό τον τρόπο διότι στις μεταχειρίσεις E100, Y100, Y70 επιβάλλονταν να ελεχθεί η πιθανότητα απωλειών νερού άρδευσης λόγω βαθιάς διήθησης ενώ στη μεταχείριση A100 χρησιμοποιούνταν ταυτόχρονα ένας αισθητήρας Moisture Point και ο Envirosmart με σκοπό την εξαγωγή μαθηματικής σχέσης που να συνδέει τις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας που λαμβάνονταν από τα δύο συστήματα. Στις μεταχειρίσεις E50 και Y50 χρησιμοποιήθηκε ο τύπος αισθητήρα με το μικρότερο μήκος διότι η δόση άρδευσης και ο τύπος εδάφους ήταν τέτοια που να μην δικαιολογείται απώλεια νερού λόγω βαθιάς διήθησης.

Οι μετρήσεις λαμβάνονταν πριν και 24 ώρες μετά από κάθε άρδευση. Από κάθε σημείο λαμβάνονταν τρεις μετρήσεις και ο μέσος όρος αυτών καταγράφονταν ως η υγρασία του εδάφους στο συγκεκριμένο σημείο. Η επιλογή για λήψη περισσοτέρων της μιας μέτρησης από κάθε αισθητήρα έγινε για λόγους βελτίωσης της ακρίβειας των μετρήσεων και ελαχιστοποίησης της πιθανότητας εσφαλμένης επεξεργασίας των χρόνων διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού. Η τοποθέτηση των αισθητήρων γινόταν επί της γραμμής σποράς, με ειδικό εξοπλισμό που συνοδεύει την συσκευή και κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιείται η προϋπόθεση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ο αισθητήρας να βρίσκεται στο μέσον της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών σταλακτήρων (Εικόνα 3.8).

Εικόνα 3.8: Διάταξη αισθητήρα Moisture Point (πάνω) και EnviroSMART επί της γραμμής σποράς.

3.6.2.3 Το Ευφυές Σύστημα Άρδευσης

Όπως αναφέρθηκε ήδη εκτός του συστήματος μέτρησης εδαφικής υγρασίας Moisture Point χρησιμοποιήθηκε και το Envirosmart και EasyAG σύστημα της εταιρείας SENTEK. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης και τρίτης καλλιεργητικής περιόδου τόσο για την καταγραφή της υγρασίας εδάφους όσο και για την ευφυή εφαρμογή της στάγδην άρδευσης στη μεταχείριση Α100 ενώ κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο (2007) χρησιμοποιήθηκε μόνο για την καταγραφή της εδαφικής υγρασίας σύμφωνα και με το τεχνικό δελτίο του έργου. Το συγκεκριμένο σύστημα διαφοροποιείται από άλλα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

υπάρχοντα συστήματα ως προς το γεγονός ότι μπορεί να συνδεθεί με επιπλέον τεχνολογικό εξοπλισμό σε επίπεδο αγρού.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από έξι λειτουργικά μέρη. Το κύριο μέρος αποτελεί ο επεξεργαστής (Envirosmart και EasyAG) και τα 3 ηλεκτρόδια παραγωγής ηλεκτρικού πεδίου, τα οποία είναι προσαρμοσμένα πάνω σε κυματοδηγό. Το δευτερεύον μέρος αποτελεί ο καταγραφέας δεδομένων (data logger), ο σωλήνας εισόδου του αισθητήρα στο έδαφος το προστατευτικό κάλυμμα και το καλώδιο τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος. Η γενική αρχή λειτουργίας του συστήματος έγκειται στην παραγωγή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθένα από τα τρία ηλεκτρόδια (αισθητήρες) το οποίο διαχέεται έξω από το σωλήνα εισόδου και ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία έχει διαφορετική τιμή ηλεκτρικού δυναμικού. Η τιμή αυτή μετατρέπεται σε % κ.ο. υγρασία εδάφους μέσω συγκεκριμένης μαθηματικής εξίσωσης. Το σύστημα Envirosmart και EasyAG είναι ένας αισθητήρας ηλεκτρικού δυναμικού που μετατρέπει ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα σε % κ.ο. υγρασία εδάφους. Έχει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων από ένα αισθητήρα ή από περισσότερους επιλεγμένους αισθητήρες αποδίδοντας μία τιμή που προκύπτει από το σύνολο των μετρήσεων κάθε αισθητήρα. Κάθε φορά που ολοκληρώνεται μία σάρωση όλων των αισθητήρων οι τιμές που συλλέγονται μετατρέπονται σε pins και αποθηκεύονται έως ότου πραγματοποιηθεί νέα σάρωση. Η σάρωση αρχίζει αμέσως μετά την τροφοδοσία του αισθητήρα με ηλεκτρική ενέργεια και η καταγραφή γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, το εύρος των οποίων επιλέγεται από το χρήστη, και για όσο υπάρχει διαθέσιμή ενέργεια για τη λειτουργία του.

Έχει τη δυνατότητα είτε συνεχούς λειτουργίας είτε διακοπτόμενης. Στη πρώτη περίπτωση ο αισθητήρας είναι σε λειτουργία συνεχώς καταγράφοντας δεδομένα και διατηρώντας στη μνήμη του μόνο αυτά που καταγράφονται στο χρόνο που έχει προεπιλεγεί ενώ στη δεύτερη αμέσως μετά την καταγραφή των δεδομένων και την αποθήκευσή τους τίθεται εκτός λειτουργίας και επαναλειτουργεί όταν ο data logger τον τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια ικανή για την επανέναρξη της λειτουργίας του. Η δεύτερη περίπτωση προϋποθέτει την σύνδεση του αισθητήρα με data logger. Το λογισμικό που διαθέτει του δίνει τη δυνατότητα να συνδέει το ηλεκτρικό δυναμικό με το βάθος, τις κανονικοποιημένες τιμές υγρασίας και περιεχόμενου όγκου αέρα στο έδαφος καθώς και άλλων πληροφοριών (ημερομηνία,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εύρος μέτρησης και ηλεκτρικό δυναμικό εξόδου), οι οποίες καθορίζουν το ποσοστό % κ.ο. της περιεχόμενης στο έδαφος υγρασίας. Ο αισθητήρας είναι εφοδιασμένος με πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας όπου αποθηκεύεται ενέργεια ικανή να διατηρήσει σε λειτουργία τον αισθητήρα για ακριβώς 2 εβδομάδες από τη στιγμή που διακοπεί κάθε είδους παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τροφοδοσία του συστήματος Envirosmart γινόταν από το δίκτυο της ΔΕΗ και επικουρικά υποστηρίζονταν από χημική πηγή ενέργειας (μπαταρία) 9V. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει έως 8 αισθητήρες από τους οποίους οι 4 μπορούν να καταγράφουν δεδομένα και αυτά να μετατρέπονται σε κατάλληλα pins εξόδου. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις ανεξάρτητοι αισθητήρες των οποίων τα δεδομένα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε μια έξοδο.

Από τεχνολογικής πλευράς, το σύστημα Envirosmart και EasyAG παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Δεν απαιτεί βαθμονόμηση και το σφάλμα στις μετρήσεις κυμαίνεται σε ποσοστό -6% - +6% ενώ όταν γίνεται βαθμονόμηση με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο χρησιμοποιείται το σφάλμα περιορίζεται μόνο κατά 50% (-3% - +3%). Παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης με μετεωρολογικούς σταθμούς, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLCs), διαφόρων τύπων data loggers ενώ μπορεί να δεχθεί κάθε εξοπλισμό τηλεμετρίας.

Εξίσου σημαντικές με τα τεχνολογικά πλεονεκτήματα είναι και οι πρακτικές ωφέλειες από την εφαρμογή αυτού του συστήματος. Αναλυτικά:

- αυξάνεται το κέρδος του παραγωγού λόγω αύξησης της παραγωγής και βελτίωσης της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων,
- μειώνεται το κόστος γιατί δεν απαιτείται επιπλέον άχρηστος εξοπλισμός (όπως επιπλέον data loggers),
- αξιοποιεί τον εξοπλισμό που ήδη διαθέτει ο παραγωγός (εγκατάσταση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, σύστημα άρδευσης κ.α.) για τη βελτιστοποίηση της χρήσης νερού, ενέργειας και χημικών,
- αποτελεί ένα ευέλικτο σύστημα καταγραφής υγρασίας εδάφους ικανό να συνδυαστεί με τον ιδιαίτερο εξοπλισμό που διαθέτει ο κάθε παραγωγός,
- είναι αξιόπιστο και ακριβές σύστημα σύγχρονης τεχνολογίας ικανό να χρησιμοποιηθεί σε πάνω από 100 διαφορετικές καλλιέργειες,
- μειώνει τις απώλειες νερού άρδευσης λόγω βαθιάς διήθησης και την έκπλυση θρεπτικών ουσιών και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

➢ μεγιστοποιεί τις επιστροφές χρημάτων.

Στην Εικόνα 3.9 απεικονίζεται ο αισθητήρας Envirosmart.

Εικόνα 3.9: Ο αισθητήρας Envirosmart και η κεφαλή ελέγχου με τα φίλτρα, την ηλεκτροβάνα και τον data logger

Ο data logger (Εικόνα 3.8) που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο GP1 της εταιρείας Delta-T devices. Ο GP1 περιλαμβάνει επτά κανάλια, δύο διαφορικά αναλογικά κανάλια (κανάλι 1 και 2), δύο κανάλια θερμοκρασίας/αντίστασης (κανάλι 3 και 4), δύο κανάλια ανάγνωσης (κανάλι 5 και 6) και ένα κανάλι για το διακόπτη (Relay). Στα δύο πρώτα κανάλια συνδέονται αισθητήρες μέτρησης υγρασίας εδάφους ενώ στα κανάλια 3 και 4 συνδέονται θερμόμετρα και το εύρος του σήματος πρέπει να είναι -2,8 έως +3,6V. Στο κανάλι 5 συνδέονται συσκευές, οι οποίες καταγράφουν δεδομένα με μεγάλη ταχύτητα και συχνότητα (ροόμετρα) ενώ στο κανάλι 6 συνδέονται συσκευές, οι οποίες καταγράφουν δεδομένα με μικρή συχνότητα (βροχόμετρα). Το κανάλι του Relay δεν είναι τίποτα περισσότερο από έναν διακόπτη ανοίγματος/κλεισίματος (On/Off). Ο GP1 λειτουργεί με μπαταρία 9V, η οποία πρέπει να αντικαθίσταται όταν το ηλεκτρικό δυναμικό που δίνει πέφτει κάτω από τα 5,5V. Κατά την αντικατάσταση της μπαταρίας τα δεδομένα που έχουν ήδη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καταγραφεί στη μνήμη του GP1 δεν χάνονται, αλλά δεν είναι δυνατή η καταγραφή νέων. Ο GP1 συνοδεύεται:

- από κατάλληλο λογισμικό (Delta-Link), το οποίο είναι συμβατό με το περιβάλλον εργασίας Windows 98, Me, 2000, XP ή νεώτερη έκδοση,
- από ειδικό καλώδιο USB και RS232 για την σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή,
- από σκληρό δίσκο χωρητικότητας 10MB,
- από λογισμικό μεταφοράς των δεδομένων σε φύλλο εργασίας (Microsoft Excel 97 ή νεώτερο) και
- από λογισμικό ανάγνωσης κειμένου (Acrobat Reader) (Delta-T Devices, 2007, Sentek Pty Ltd, 2006).

Το ευφυές σύστημα στάγδην άρδευσης της μεταχείρισης Α100 λειτουργούσε ανεξάρτητα από το σύστημα άρδευσης των υπολοίπων 6 μεταχειρίσεων. Η αρχή λειτουργίας του βασίζονταν στην καταγραφή της μέσης % κ.ο. υγρασίας εδάφους, σε βάθος 90cm, από τον αισθητήρα Envirosmart ενώ οι διάφορες τιμές της καταγράφονταν σε data logger ανά 30 λεπτά της ώρας. Ο συγκεκριμένος data logger διέθετε ειδικό relay (διακόπτη on-off) στον οποίο συνδέθηκε ηλεκτροβάνα εναλλασσόμενου ρεύματος 24V. Μέσω του ειδικού λογισμικού του συστήματος επιλέχθηκε ένα ανώτατο όριο και ένα κατώτατο όριο εδαφικής υγρασίας τα οποία όταν καταγράφονταν από τον αισθητήρα και αποθηκεύονταν στον data logger καθόριζαν την λήξη και έναρξη της άρδευσης, αντίστοιχα. Ως ανώτατο όριο επελέγη η μέση τιμή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 0-60cm όταν το έδαφος βρισκόταν στην υδατοικανότητα (FC=32,68% κ.ο.) και ως κατώτατο όριο το 75% αυτής (USM=24,5% κ.ο.). Το ποσοστό αυτό προέκυψε από την ωφέλιμη υγρασία εδάφους (Useful Soil Moisture, USM) (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999).

Θεωρητικά το έδαφος μπορεί να εφοδιάσει με νερό τα φυτά μιας καλλιέργειας έως ότου η εδαφική υγρασία φτάσει στο σημείο μόνιμης μάρανσης (Permanent Wilt Point, PWP). Η συνολική αυτή ποσότητα νερού αποτελεί τη διαθέσιμη υγρασία εδάφους (Available Soil Moisture, ASM). Ωστόσο, όσο η υγρασία του εδάφους μειώνεται τόσο πιο ισχυρά συγκρατείται το περιεχόμενο νερό στα κολλοειδή του εδάφους και επομένως τα φυτά δυσκολεύονται να απορροφήσουν τις απαραίτητες ποσότητες για την κάλυψη των αναγκών τους. Έτσι, όταν η περιεχόμενη υγρασία εδάφους πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο τότε τα φυτά υφίστανται υδατική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καταπόνηση. Το κλάσμα της ASM που μπορεί εύκολα να απορροφήσει ένα φυτό από το έδαφος χωρίς να υποστεί υδατική καταπόνηση ισούται με την USM (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999). Δηλαδή:

$$USM = F \times ASM \text{ (σε mm)} \tag{3.2}$$

και $$ASM = \frac{(FC - PWP)}{100} \times RD \text{ (σε mm)} \tag{3.3}$$

όπου:

ASM είναι η μέγιστη διαθέσιμη υγρασία εδάφους (mm),

USM είναι η άμεσα διαθέσιμη υγρασία εδάφους (mm),

FC είναι η υγρασία στην υδατοϊκανότητα (% κ.ο.),

PWP είναι η υγρασία στο σημείο μόνιμης μάρανσης (% κ.ο.),

RD είναι το βάθος ριζοστρώματος (mm)

F είναι ο συντελεστής εξάντλησης υγρασίας της καλλιέργειας (για το σόργο p=0,55) (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999). Οι Rogers et al. (1998) αναφέρουν ότι για την καλλιέργεια του σόργου ο συντελεστής εξάντλησης υγρασίας της καλλιέργειας μπορεί να φτάσει το 0,4 ή ακόμη και το 0,3 χωρίς η καλλιέργεια να παρουσιάσει σημάδια υδατικής καταπόνησης. Στην παρούσα έρευνα ο συντελεστής εξάντλησης υγρασίας της καλλιέργειας θεωρήθηκε ίσος με 0,55 ενώ το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος ήταν ίσο με 60cm μετά από σχετικές μετρήσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το σύστημα ενεργοποιούσε την ηλεκτροβάνα (έναρξη άρδευσης) όταν καταγράφονταν εδαφική υγρασία ίση με 24% κ.ο. (USM=24,5%κ.ο.) και την απενεργοποιούσε (λήξη της άρδευσης) όταν καταγράφονταν εδαφική υγρασία ίση με 32% κ.ο. (FC=32,68%κ.ο.). Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακέραιες τιμές πλησίον των υπολογισμένων τιμών (USM=24,5%κ.ο. και FC=32,68%κ.ο., αντίστοιχα) λόγω του γεγονότος ότι ο αισθητήρας ήταν προρυθμισμένος να διαβάζει και να αποδίδει ακέραιες τιμές εδαφικής υγρασίας.

3.7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

3.7.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI), είναι μια αδιάστατη παράμετρος του φυλλώματος των φυτών και ορίζεται ως ο λόγος της φυλλικής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

επιφάνειας ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους. Οι μέθοδοι μέτρησης του LAI διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες (Bréda, 2003). Λεπτομέρειες για το δείκτη φυλλικής επιφάνειας θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Για την μέτρηση του LAI έχουν αναπτυχθεί διάφορες έμμεσες μέθοδοι (Bréda, 2003). Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα SunScan canopy analysis (της Delta-T Devices Ltd). Το συγκεκριμένο σύστημα μετρά την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία μήκους κύματος από 400-700nm, πάνω και κάτω από το φύλλωμα της καλλιέργειας. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας υπολογίζεται με βάση το νόμο του Beer από την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται κατά τις μεσημβρινές ώρες και όταν η γωνία κλίσης του ηλίου έχει μικρές τιμές ενώ πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του συστήματος κατά τις ώρες της ημέρας που η γωνία κλίσης είναι μεγαλύτερη από 60^{o} διότι τότε επηρεάζεται η καταγραφόμενη τιμή της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται οι μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Potter et al., 1996, Webb et al., 2008).

Το σύστημα SunScan canopy analysis αποτελείται από τρία λειτουργικά μέρη. Πρώτον από τον ανιχνευτή SunScan, δεύτερον από τον αισθητήρα BFS (Beam Fraction Sensor) και τρίτον από τη συσκευή συλλογής δεδομένων η οποία περιλαμβάνει και το λογισμικό εφαρμογής. Ο ανιχνευτής SunScan έχει μήκος 1,5m, είναι φορητός και μετρά την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία κάτω από το φύλλωμα των φυτών. Έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με τον αισθητήρα BFS ή ανεξάρτητα από αυτόν. Όταν χρησιμοποιούνται μαζί λαμβάνονται δεδομένα που αφορούν στο ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη φυλλική επιφάνεια του φυτού σε σύγκριση με αυτή που φτάνει πάνω από αυτή. Όταν ο ανιχνευτής χρησιμοποιείται μόνος του υπολογίζει την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος και από αυτή το LAI. Η συσκευή συλλογής των δεδομένων αποτελείται από τον μικροεπεξεργαστή, ο οποίος καταγράφει τις μετρήσεις του ανιχνευτή SunScan και του αισθητήρα BFS και υπολογίζει αυτόματα την τιμή του LAI. Πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος έναντι των υπολοίπων αποτελεί η δυνατότητα λήψης μετρήσεων ακόμα και υπό συνθήκες συνεχούς ή παροδικής νέφωσης του ουρανού ενώ τα υπόλοιπα συστήματα απαιτούν σταθερές συνθήκες του ουρανού για μεγάλο χρονικό διάστημα της ημέρας (Wilhelm et al., 2000).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Οι μετρήσεις του LAI πραγματοποιούνταν κάθε εβδομάδα. Συνολικά ελήφθησαν 18 μετρήσεις. Η επιλογή οι μετρήσεις να γίνονται κάθε εβδομάδα βασίστηκε στην θεωρία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο και απαιτεί τουλάχιστο 15 μετρήσεις από κάθε μεταβλητή που εξετάζει, και η οποία εφαρμόστηκε για την εξαγωγή μοντέλου πρόβλεψης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας από ανεξάρτητες παραμέτρους. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν στο ίδιο σημείο της κάθε επανάληψης, το οποίο είχε έκταση 2,0m^2 (ίση με το μήκος 2,5 μέτρων επί το πλάτος του εδάφους που εκμεταλλεύονταν τα φυτά στη συγκεκριμένη γραμμή σποράς, 0,8m). Η θέση αυτή καθορίστηκε κατά την πρώτη μέτρηση με γνώμονα την ομοιομορφία ανάπτυξης των φυτών στις δύο μεσαίες γραμμές σποράς έτσι ώστε να μειώνεται η αλληλεπίδραση με γειτονικά πειραματικά τεμάχια στο ελάχιστο. Σε κάθε σημείο μέτρησης, παράλληλα προς τις γραμμές σποράς, λαμβάνονταν 4 μετρήσεις, δύο μετρήσεις εκατέρωθεν της γραμμής σποράς, και ο μέσος όρος των τιμών αυτών καταγράφονταν ως το LAI του συγκεκριμένου πειραματικού τεμαχίου.

Επιπλέον, επιχειρήθηκε ο υπολογισμός του δείκτη φυλλικής επιφάνειας εφαρμόζοντας για πρώτη φορά εναλλακτικής μεθόδου υπολογισμού του LAI. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, στη μεταχείριση Ε100, μετά από κάθε μέτρηση LAI γινόταν η δειγματοληψία για τον υπολογισμό της χλωρής και ξηρής βιομάζας του φυτού. Το φυτό χωρίζονταν σε τρία μέρη (φύλλα, στέλεχος και ταξιανθία). Μετά τη ζύγιση και πριν τα φύλλα ξηρανθούν στο πυριαντήριο τοποθετούνταν στο έδαφος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν μία τετραγωνική επιφάνεια. Στη συνέχεια λαμβάνονταν από ορισμένο ύψος φωτογραφία με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και ακολουθούσε επεξεργασία και μέτρηση της περιμέτρου της έκτασης που κάλυπταν τα κομμένα φύλλα με το ειδικό πρόγραμμα σχεδίασης AutoCAD. Τα αποτελέσματα συγκρίνονταν με τις μετρήσεις που λαμβάνονταν από το σύστημα SunScan.

3.7.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Κατά τη διάρκεια καθεμιάς καλλιεργητικής περιόδου λαμβάνονταν 21 μετρήσεις του ύψους του κεντρικού στελέχους του φυτού. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε εβδομάδα από το ίδιο σημείο από το οποίο λαμβάνονταν και οι μετρήσεις LAI και από το σύνολο των φυτών που υπήρχαν εκεί. Ο μέσος όρος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

όλων των υψών των επιμέρους φυτών καταγράφονταν ως το μέσο ύψος του κάθε πειραματικού τεμαχίου. Το ύψος μετρούνταν από την επιφάνεια του εδάφους ως το σημείο έκπτυξης του φύλλου σημαίας με ειδική άκαμπτη ράβδο μήκους 2m. Το πλήθος των μετρήσεων καθορίστηκε όπως και στην περίπτωση των μετρήσεων LAI με τη διαφορά ότι η εναρκτήρια μέτρηση ύψους πραγματοποιούνταν περίπου ένα μήνα πριν την αντίστοιχη εναρκτήρια μέτρηση του LAI.

Οι μετρήσεις χλωρής και ξηρής βιομάζας που πραγματοποιήθηκαν και τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους ήταν 15, συνολικά. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε μεμονωμένα φυτά που επιλέγονταν τυχαία από τις τέσσερις μεσαίες γραμμές σποράς. Το πλήθος των μετρήσεων καθορίστηκε όπως και στην περίπτωση των μετρήσεων LAI και του ύψους κεντρικού στελέχους φυτών με βάση τη θεωρεία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Επιπλέον λαμβάνονταν μέριμνα κάθε φορά που η τυχαιοποίηση οδηγούσε σε επιλογή φυτού από την έκταση στην οποία πραγματοποιούνταν μετρήσεις LAI και ύψους φυτών να απορρίπτονται και να επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου επιλεγεί φυτό εκτός της συγκεκριμένης έκτασης. Η προσέγγιση αυτή έγινε για να μην αλλοιωθεί η πυκνότητα των φυτών και επομένως για να μην αλλοιωθούν οι μετρήσεις LAI και ο μέσος όρος ύψους φυτών. Μετά τη δειγματοληψία τα φυτά χωρίζονταν σε τρία μέρη (φύλλα, στέλεχος και ταξιανθία) τα οποία ζυγίζονταν χωριστά και από το άθροισμα των επιμέρους βαρών υπολογιζόταν το συνολικό βάρος του φυτού το οποίο ανάγονταν σε παραγωγή χλωρής βιομάζας ανά στρέμμα. Στη συνέχεια τα μέρη του φυτού ξηραίνονταν σε πυριαντήριο στους 105^{o}C μέχρι σταθεροποιήσεως του βάρους τους για τον προσδιορισμό της ξηρής φυτικής βιομάζας (Hunsaker et al., 1998, Tognetti et al., 2003). Κατά τη δεύτερη και τρίτη καλλιεργητική περίοδο λαμβάνονταν μετρήσεις της διαμέτρου των στελεχών (μετά την ξήρανση) με σκοπό τον υπολογισμό της μάζας του φυτού και την εξαγωγή μοντέλου πρόβλεψης παραγωγής με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

3.8. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι κλιματολογικοί παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη και παραγωγικότητα των φυτών. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η βροχόπτωση και η ταχύτητα του ανέμου. Η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία επηρεάζουν τόσο άμεσα όσο και έμμεσα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

την ανάπτυξη των φυτών ενώ η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζουν έμμεσα την ανάπτυξη των φυτών καθώς διαμορφώνουν το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (Βύρλας, 2007). Το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας εκφράζεται με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας η οποία είναι το γινόμενο της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς επί το φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα κατά τη διάρκεια των τριών ετών της έρευνας καταγράφονταν από μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής. Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και σε απόσταση 50m περίπου από το μέσον του πειραματικού αγρού. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν αφορούσαν τις ημερήσιες τιμές της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της βροχόπτωσης και της ταχύτητας του ανέμου. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά ώρα και απαιτούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο FAO Penman – Monteith (ο μετεωρολογικός σταθμός υπολογίζει αυτόματα την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ETo). Η καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιούνταν σε ειδικό καταγραφέα (data logger) και η εξαγωγή τους από το σταθμό γινόταν με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος ήταν εφοδιασμένος με το λογισμικό Metwin version 2.00. Η επεξεργασία των δεδομένων γινόταν σε υπολογιστικό φύλλο του Excel.

3.9. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα αναλύθηκαν ως προς την διακύμανση της παραλλακτικότητας ANOVA. Για τη σύγκριση των μέσων όρων χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη σημαντική διαφορά (Least Significant Difference, LSD) για επίπεδο σημαντικότητας $P<0,05$. Η κατάταξη των μέσων όρων έγινε με την εφαρμογή του πολλαπλού τεστ Duncan ενώ για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το στατιστικό πακέτο SPSS version 17 για χρήση σε περιβάλλον Windows.

Τα διαγράμματα που απεικονίζουν την σχέση της παραγωγής ξηρής βιομάζας με την ανεξάρτητη μεταβλητή στο τελικό μοντέλο πρόβλεψης κατασκευάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer 7 (Golden Software, Inc).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΟΣΕΩΝ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικειμενικός σκοπός των αρδεύσεων είναι ο εφοδιασμός των καλλιεργειών με το απαραίτητο νερό για την κανονική ανάπτυξη και μεγιστοποίηση της αποδόσεώς τους σε συνδυασμό με την παραγωγή υψηλής ποιότητα προϊόντων. Η ποσοτική εκτίμηση της αναγκαίας ποσότητας νερού για την ανάπτυξη των φυτών αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για το σωστό προγραμματισμό και εφαρμογή των αρδεύσεων (Παπαζαφειρίου, 1994).

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας βασίζεται στη μέθοδο του φυτικού συντελεστή. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή απαιτείται η γνώση του φυτικού συντελεστή της καλλιέργειας σε κάθε στάδιο ανάπτυξης και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (Doorenbos and Pruitt, 1977, Παπαζαφειρίου, 1994, Παπαζαφειρίου,1997, Allen et al., 1998, Bos et al., 2009). Επιπροσθέτως, λαμβάνονται υπόψη η διαθέσιμη υγρασία εδάφους και το κλάσμα αυτής, η ωφέλιμη υγρασία εδάφους, καθώς και η εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους. Επομένως ο υπολογισμός της αρδευτικής δόσης ολοκληρώνεται σε τρία στάδια, τα οποία είναι:

- υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ETo),
- υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ETc) μέσω του φυτικού συντελεστή και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και
- υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας στον αγρό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

4.2. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΗΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ

Μια καλλιεργούμενη έκταση δέχεται και χάνει ποσότητες νερού. Κατά την καλλιεργητική περίοδο οι πηγές εμπλουτισμού του εδάφους με νερό είναι η βροχόπτωση και η άρδευση. Από την άλλη, το καλλιεργούμενο έδαφος χάνει μια ποσότητα νερού από την επιφάνειά του με τη διαδικασία της εξάτμισης, μια επιπλέον ποσότητα από την καλλιέργεια με τη διαδικασία της διαπνοής και την εξάτμιση από την φυλλική επιφάνεια. Το άθροισμα των δύο ποσοτήτων νερού που απομακρύνονται από το έδαφος αποτελεί την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (Evapotranspiration, ET). Η ET εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1994).

4.2.1. ΕΞΑΤΜΙΣΗ (Ε)

Κατά τη διάρκεια της ημέρας μια ποσότητα νερού απομακρύνεται από ανοιχτές υδατικές επιφάνειες υπό μορφή υδρατμών. Με την ίδια διαδικασία απομακρύνεται νερό και από την επιφάνεια του εδάφους αλλά και από υγρές επιφάνειες των φυτών (φύλλα και βλαστούς). Η διαδικασία κατά την οποία το νερό μεταπίπτει από την υγρή στην αέρια φάση ονομάζεται εξάτμιση, Ε (Brouwer et al., 1986, Allen et al., 1998).

Για να πραγματοποιηθεί η μετάπτωση του νερού από την υγρή φάση στην αέρια απαιτείται ενέργεια. Πηγή αυτής της ενέργειας είναι κυρίως η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και δευτερευόντως η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Το φαινόμενο της εξάτμισης παρατηρείται όταν υπάρχει διαφορά στην πίεση υδρατμών μεταξύ μιας επιφάνειας και της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας. Όταν η διαφορά αυτή είναι μεγάλη τότε το φαινόμενο είναι έντονο ενώ όταν η περιβάλλουσα την συγκεκριμένη επιφάνεια ατμόσφαιρα τείνει να κορεστεί σε υδρατμούς το φαινόμενο εξασθενεί ή παύει να υφίσταται. Η ποσότητα υδρατμών που μπορεί να χωρέσει σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί. Επομένως το φαινόμενο της εξάτμισης εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία του, την περιεχόμενη υγρασία (υγρασία της ατμόσφαιρας) και την ηλιακή ακτινοβολία.

Στην περίπτωση των καλλιεργούμενων εδαφών, η εξάτμιση εξαρτάται και από το ποσοστό σκίασης της επιφάνειας του εδάφους από το φύλλωμα της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

καλλιέργειας αλλά και από την διαθέσιμη υγρασία στην επιφάνεια του εδάφους. Οι συχνές βροχοπτώσεις και/ή οι συχνές αρδεύσεις καθώς και η συμβολή του υπόγειου νερού (όταν η υπόγεια στάθμη βρίσκεται ψηλά) συμβάλουν στην ενίσχυση του φαινομένου της εξάτμισης. Όταν οι βροχοπτώσεις είναι σπάνιες, το εύρος άρδευσης μεγάλο και η συμβολή του υπόγειου νερού μηδενική τότε η υγρασία του εδάφους μειώνεται και συνεπώς το φαινόμενο της εξάτμισης εξασθενεί. Τέλος όταν επικρατούν τελείως ξηρικές συνθήκες (παντελής απουσία βροχοπτώσεων, άρδευσης) η περιεχόμενη υγρασία εδάφους μειώνεται ταχύτατα και η εξάτμιση μηδενίζεται εντός λίγων ημερών (Allen et al., 1998).

4.2.2. ΔΙΑΠΝΟΗ (Τ)

Η διαδικασία απώλειας των υδρατμών από τα φύλλα των φυτών ονομάζεται διαπνοή και το φαινόμενο της διαπνοής επηρεάζει την ποσότητα του νερού που θα κινηθεί μέσω του φυτού. Η διαπνοή συμβαίνει κατά το χρονικό διάστημα που στομάτια των φύλλων είναι ανοιχτά. Τότε έρχεται σε επαφή ο σχεδόν πάντα κορεσμένος σε υδρατμούς αεροφόρος χώρος του φύλλου με τον λιγότερο κορεσμένο ατμοσφαιρικό αέρα. Έτσι, γίνεται διάχυση υδρατμών από τους αεροφόρους χώρους του φύλλου προς την ατμόσφαιρα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι οι αεροφόροι χώροι του φύλλου να γίνονται ξηρότεροι και να προκαλείται τάση αναπλήρωσης του χαμένου νερού και των εν διαλύσει θρεπτικών στοιχείων από τους διπλανούς ιστούς οι οποίοι με τη σειρά τους δέχονται νερό και θρεπτικά στοιχεία από άλλους γειτονικούς τους ιστούς δημιουργώντας έτσι μια αναρροφητική δύναμη στο φυτό (Καράταγλης, 1999).

Η διαπνοή όπως και η εξάτμιση εξαρτάται από την διαθέσιμη ενέργεια, την ποσότητα υδρατμών στην περιβάλλουσα το φύλλο ατμόσφαιρα και τον άνεμο. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου της διαπνοής διαδραματίζουν η ηλιακή ακτινοβολία και η ατμοσφαιρική υγρασία. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την διαπνοή είναι η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους στο βάθος του ριζοστρώματος, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του και η αλατότητα του νερού. Το ρυθμό διαπνοής επηρεάζουν επίσης τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και του περιβάλλοντος αλλά και οι καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζονται σε κάθε περιοχή. Τέλος όταν γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της διαπνοής θα πρέπει να συνυπολογίζονται ο τύπος της καλλιέργειας, το στάδιο ανάπτυξής της, το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται εγκατεστημένη και η γενικότερη διαχείριση της (Allen et al., 1998).

4.2.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ΕΤ)

Όπως ήδη αναφέρθηκε η εξατμισοδιαπνοή είναι η ποσότητα του νερού που απομακρύνεται από τον αγρό με τις διαδικασίες εξάτμισης και διαπνοής. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου η εξάτμιση και η διαπνοή συμβάλουν σε διαφορετικό ποσοστό στην διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής. Όταν η καλλιέργεια βρίσκεται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης το έδαφος καλύπτεται σε μικρό ποσοστό από το φύλλωμα της καλλιέργειας και επομένως το μεγαλύτερο μέρος της εξατμισοδιαπνοής προέρχεται από την εξάτμιση. Αργότερα και όσο η καλλιέργεια αναπτύσσεται το έδαφος καλύπτεται όλο και περισσότερο από το φύλλωμα της καλλιέργειας και το μεγαλύτερο μέρος της εξατμισοδιαπνοής προέρχεται από την διαπνοή της καλλιέργειας ενώ η εξάτμιση περιορίζεται και εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Επομένως την περίοδο αμέσως μετά τη σπορά το 100% της ΕΤ προέρχεται αποκλείστηκα από την εξάτμιση ενώ όταν η φυτοκάλυψη είναι μέγιστη (100%), ποσοστό τουλάχιστο 90% της ΕΤ προέρχεται από την διαπνοή (Παπαζαφειρίου, 1994, Παπαζαφειρίου, 1997, Allen et al., 1998). Ωστόσο, μακροχρόνιες έρευνες έδειξαν ότι όταν το ποσοστό κάλυψης του εδάφους είναι 50-60% η εξατμισοδιαπνοή ελάχιστα διαφέρει από την αντίστοιχη τιμή της όταν η φυτοκάλυψη είναι 100% (Tanner, 1963, Swan et al., 1963).

4.2.3.1 Παράγοντες που Επιδρούν στην Εξατμισοδιαπνοή

Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι κλιματικοί παράγοντες, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας καθώς και οι καλλιεργητικές πρακτικές επηρεάζουν την εξάτμιση και τη διαπνοή. Επομένως οι ίδιοι αυτοί παράγοντες θα καθορίζουν και την εξατμισοδιαπνοή η οποία είναι το αποτέλεσμα της συνεργηστικής δράσης της εξάτμισης και της διαπνοής.

Οι κλιματικοί παράγοντες επιδρούν ομοιόμορφα στην διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής των διαφόρων φυτικών ειδών. Από αυτούς κυριότεροι είναι η καθαρή ακτινοβολία, ο άνεμος, η υγρασία και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Το σύνολο αυτών των παραγόντων καθορίζει την διαδικασία μετακίνησης των υδρατμών μεταξύ φυτικής επιφάνειας και ατμόσφαιρας. Κατά συνέπεια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

δημιουργείται μια αναρροφητική δύναμη ικανή να απορροφήσει νερό και θρεπτικά στοιχεία από το έδαφος συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξη και παραγωγικότητα της καλλιέργειας (Παπαζαφειρίου, 1994).

Οι φυτικοί παράγοντες σε αντίθεση με τους κλιματικούς επιδρούν ποικιλοτρόπως στην εξατμισοδιαπνοή των διαφόρων φυτικών ειδών. Ως γνωστόν τα διάφορα είδη φυτών παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους ως προς τις διαστάσεις σποράς και φύτευσης, την πυκνότητα του φυλλώματος, την γωνία έκπτυξης των φύλλων, το ύψος, την πυκνότητα του ριζικού τους συστήματος και το βιολογικό τους κύκλο. Έτσι η εξατμισοδιαπνοή των φυτών διαφέρει ανάλογα με το φυσιολογικό στάδιο στο οποίο βρίσκονται τα φυτά (ιδίως τα ετήσια) λόγω του διαφορετικού ποσοστού φυτοκάλυψης του εδάφους αλλά και των ιδιαίτερων φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φυτών όπως αυτά προκύπτουν από τις διαφορετικές φυσιολογικές λειτουργίες τους (Παπαζαφειρίου, 1994).

Εκτός από τους κλιματικούς και φυτικούς παράγοντες και διάφοροι παράγοντες διαχείρισης του περιβάλλοντος και εγκατάστασης μιας καλλιέργειας επιδρούν στην διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής. Μεταξύ άλλων η αλατότητα του εδάφους, η κακή ανάπτυξη του ριζικού συστήματος λόγω αδιαπέραστου εδαφικού ορίζοντα, η φτωχή γονιμότητα του εδάφους, η περιορισμένες εισροές, η παρουσία εντομολογικών και μυκητολογικών ασθενειών πιθανόν να περιορίσουν την εξατμισοδιαπνοή. Η φυτοκάλυψη του εδάφους, η πυκνότητα των φυτών και η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού αποτελούν μια σειρά άλλων παραμέτρων που πρέπει να εξετάζονται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και από το υδατικό έλλειμμα και επηρεάζει ανάλογα την εξατμισοδιαπνοή. Από την άλλη πλευρά, περίσσια νερού στο έδαφος μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες έλλειψης αερισμού του ριζοστρώματος με αποτέλεσμα το ριζικό σύστημα να μην μπορεί να απορροφήσει το απαιτούμενο νερό για την κάλυψη των αναγκών του φυτού (Allen et al., 1998).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής θα πρέπει να συνυπολογίζονται και οι διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης των καλλιεργειών. Καλλιεργητικές τεχνικές και μέθοδοι άρδευσης επιδρούν στην διαμόρφωση του μικροκλίματος επηρεάζοντας τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και το ποσοστό διύγρανσης του εδάφους και της επιφάνειας της καλλιέργειας. Για παράδειγμα σε μια περιοχή που

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

πνέουν έντονοι άνεμοι ένας καλά σχεδιασμένος ανεμοφράκτης (συστάδα δέντρων) θα μείωνε αισθητά την εξατμισοδιαπνοή σε ένα αγρό πίσω από αυτόν. Η κάλυψη του εδάφους με άχυρα ή υπολείμματα προηγούμενης καλλιέργειας αποτελεί ένα άλλο μέτρο μείωσης της εξατμισοδιαπνοής. Ωστόσο, στην γεωργική πρακτική φαίνεται ότι ένας λεπτομερής σχεδιασμός συστημάτων άρδευσης που αρδεύουν μέρος του αγρού (στάγδην άρδευση) καθώς και η εφαρμογή σύγχρονης τεχνολογίας με στόχο τον περιορισμό της αρδευόμενης έκτασης και την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού θα μπορούσε να περιορίσει την εξάτμιση Allen et al., 1998).

4.2.3.2 Ορισμοί και Έννοιες της Εξατμισοδιαπνοής

Το νερό που χρειάζεται για την κανονική ανάπτυξη και βέλτιστη απόδοση μιας καλλιέργειας εκφράζεται με τον όρο ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας και αντιπροσωπεύεται από την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (crop evapotranspiration, ETc). Με τον όρο εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας περιγράφεται η ποσότητα του νερού που καταναλώνεται από μια καλλιέργεια που είναι απαλλαγμένη από κάθε είδους φυτικές ασθένειες, η οποία αναπτύσσεται σε μεγάλα χωράφια, χωρίς να υφίσταται καταπόνηση από την έλλειψη νερού και θρεπτικών στοιχείων και επιτυγχάνει το μέγιστο της απόδοσης κάτω από τις συνθήκες στις οποίες αναπτύσσεται. Η αντίστοιχη ποσότητα νερού που καταναλώνεται από μια καλλιέργεια η οποία αναπτύσσεται σε πραγματικές συνθήκες χωραφιού (προσβολή ή μη από ασθένειες, πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας, γόνιμο ή άγονο έδαφος) αποτελεί την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (actual evapotranspiration, ETa) (Παπαζαφειρίου, 1997). Όπως γίνεται αντιληπτό η ETc είναι το πάνω όριο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ενώ στη σπάνια περίπτωση στην οποία η καλλιέργεια αναπτύσσεται σε ιδανικές συνθήκες η ETc=ETa. Διευκρινίζεται ότι οι ανάγκες μιας καλλιέργειας σε νερό αποτελούν τη δόση άρδευσης που πρέπει να χορηγηθεί στη συγκεκριμένη καλλιέργεια για να καλυφτούν οι απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής αφού ληφθεί υπόψη η ωφέλιμη βροχόπτωση και το επιπλέον νερό που πρέπει να χορηγηθεί για την έκπλυση των αλάτων ((Παπαζαφειρίου, 1997, Allen et al., 1998).

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, εξαρτάται από το κλίμα και τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Η επίδραση του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κλίματος στην ETc εκφράζεται από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (reference evapotranspiration, ETo) ή βασική εξατμισοδιαπνοή (basal evapotranspiration, ETr). Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς είναι η εξατμισοδιαπνοή από μια καλλιέργεια αναφοράς ή βάσης που αναπτύσσεται δυναμικά κάτω από συνθήκες πλήρους επάρκειας νερού. Ως καλλιέργεια αναφοράς θεωρείται ένας εκτεταμένος χλοοτάπητας που καλύπτει πλήρως το έδαφος και έχει ομοιόμορφο ύψος που κυμαίνεται μεταξύ 8 και 15cm ή η καλλιέργεια μηδικής (Παπαζαφειρίου, 1997).

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Ο υπολογισμός της βασικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται με διαδικασίες που βασίζονται σε μετρήσεις των κλιματικών παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό και το είδος των κλιματικών παραμέτρων που χρησιμοποιούν και τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους. Μια από τις μεθόδους αυτές που σήμερα χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι η συνδυασμένη μέθοδος Penman – Monteith κατά FAO μαζί με την τροποποιημένη μέθοδο Penman. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν είναι αυτή των Blaney-Criddle και η τροποποιημένη Blaney-Criddle (Παπαζαφειρίου, 1997).

Από αυτές οι δύο πρώτες υπολογίζουν με μεγάλη ακρίβεια την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ενώ οι άλλες δύο είναι λιγότερο ακριβείς μέθοδοι. Η τροποποιημένη μέθοδος Penman και η συνδυασμένη μέθοδος Penman – Monteith κατά FAO απαιτούν γνώση πολλών παραμέτρων όπως είναι η πίεση υδρατμών κορεσμού, η πραγματική πίεση υδρατμών, η κλίση της καμπύλης που εκφράζει την πίεση υδρατμών, η ροή θερμότητας στο έδαφος και η καθαρή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Το σύνολο αυτών των πληροφοριών είναι εξαιρετικά δύσκολο να συγκεντρωθεί υπό τις συνθήκες της καθημερινής γεωργικής πρακτικής ενώ το κόστος είναι δεκαπλάσιο από το αντίστοιχο κόστος εφαρμογής της μεθόδου του εξατμισίμετρου τύπου Α (Stanhill, 2002), τόσο για το μεμονωμένο παραγωγό όσο και για ομάδα παραγωγών. Από την άλλη απαιτούνται ειδικές γνώσεις και πολύπλοκοι υπολογισμοί για την εφαρμογή τους γεγονός που τις καθιστά χρονοβόρες γιατί πρέπει να αφιερωθεί διπλάσιος χρόνος στους υπολογισμούς (Stanhill, 2002). Έτσι, καθίσταται δυσχερής η εφαρμογή αυτών των μεθόδων από τους παραγωγούς οι οποίοι ενδιαφέρονται για μια μέθοδο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

προσδιορισμού των αναγκών των καλλιεργειών τους σε νερό η οποία να είναι εύκολη στο χειρισμό, να απαιτεί τους λιγότερους δυνατούς υπολογισμούς, να είναι ακριβής και το κόστος εγκάταστασής της να μην είναι απαγορευτικό. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα έρευνα, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έγινε με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου τύπου Α.

4.3.1. ΤΟ ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟ

Τα εξατμισίμετρα με ελεύθερη επιφάνεια, τα οποία είναι γνωστά σαν εξατμισίμετρα τύπου λεκάνης (evaporation pans), παρέχουν ένα μέτρο της συνδυασμένης επίδρασης που ασκούν η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα πάνω στην εξάτμιση από μια συγκεκριμένη ελεύθερη επιφάνεια νερού. Στους παραπάνω κλιματικούς παράγοντες αντιδρούν περίπου με τον ίδιο τρόπο οι διάφορες καλλιέργειες (Παπαζαφειρίου, 1994, Allen et al., 1998). Η μέθοδος είναι ευρύτατα διαδεδομένη, απλή και εύκολη στην εφαρμογή (Elliades, 1988). Ο Stanhill το 1986 αναφέρει ότι μετά από 35 χρόνια έρευνας στους αγρούς του Ισραήλ πιστοποιήθηκε η πρακτικότητα της μεθόδου στον προγραμματισμό των αρδεύσεων καθώς και η συμβολή της στην αύξηση της αποδοτικότητας άρδευσης.

4.3.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Εξάτμιση από Εξατμισίμετρο

Η εξάτμιση από ένα εξατμισίμετρο τύπου λεκάνης και μια καλλιεργούμενη έκταση δεν ταυτίζονται απόλυτα. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που διαφοροποιούν τη μία από την άλλη, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι.

- Η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ποσοστό που ανακλάται από μία ελεύθερη επιφάνεια νερού είναι μικρότερη από αυτή που ανακλάται από μία καλλιέργεια (5-7% και 20-30% αντίστοιχα). Επομένως το νερό έχει περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια για εξάτμιση από ότι οι καλλιέργειες.
- Η αποθήκευση θερμότητας μέσα στο εξατμισίμετρο μπορεί να είναι σημαντική, με αποτέλεσμα να παρατηρείται η ίδια εξάτμιση κατά την ημέρα και τη νύχτα γεγονός που δεν συμβαίνει στις καλλιέργειες.
- Είναι πιθανό να υπάρξει μεταφορά θερμότητας από ή προς το εξατμισίμετρο μέσω των τοιχωμάτων του, με ανάλογη επίδραση στην εξάτμιση. Ο παράγοντας αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός στα βυθισμένα εξατμισίμετρα.

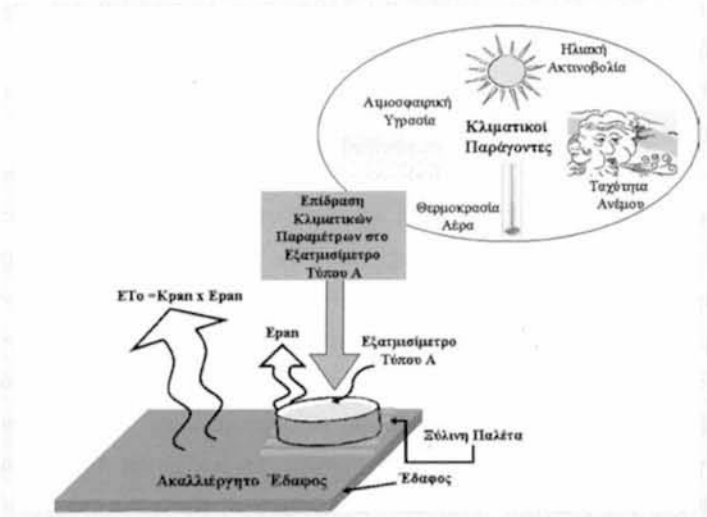
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- Το χρώμα των εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων της συσκευής διαφοροποιεί το ύψος της εξάτμισης.
- Η θέση, ο τρόπος εγκαταστάσεως και το περιβάλλον γύρο από το εξατμισίμετρο επηρεάζουν το μέγεθος της εξάτμισης.

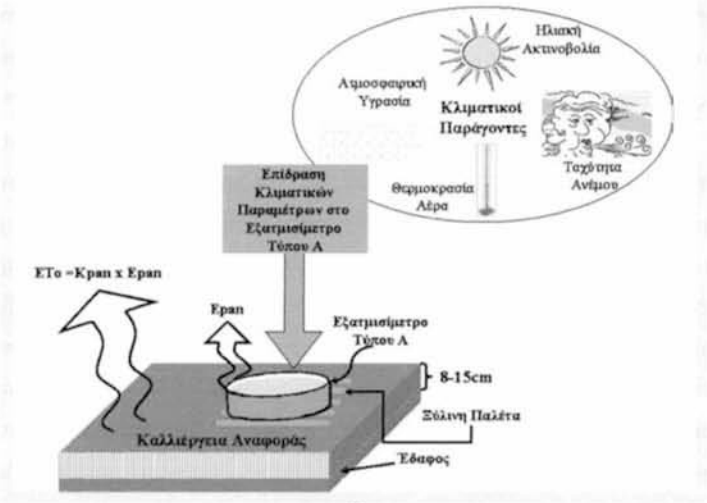
Τα εξατμισίμετρα τύπου λεκάνης για να δώσουν αξιόπιστες εκτιμήσεις των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό πρέπει να σχεδιαστούν και να τοποθετηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούν την επίδραση των παραπάνω παραγόντων (Παπαζαφειρίου, 1994). Παλαιότερες έρευνες έδειξαν ότι όταν τα εξατμισίμετρα τύπου Α χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και διατηρούνται κατάλληλα τότε παρατηρείται υψηλή συσχέτιση μεταξύ της εξάτμισης από εξατμισίμετρο και της εκτιμώμενης εξατμισοδιαπνοής με τη χρήση των μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω (Pruitt, 1966, Doorenbos and Pruitt, 1975, Snyder, 1992). Ωστόσο τα εξατμισίμετρα είναι κατασκευασμένα για να συμμετέχουν στον προγραμματισμό των αρδεύσεων ώστε να διατηρείται η υγρασία του εδάφους σε επίπεδα που να μην προκαλείται καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού στα φυτά (Smajstrla et al., 2000). Επομένως μπορεί να θεωρηθεί, χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα, ότι οι παραπάνω παράγοντες έχουν αμελητέα επίδραση στον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Έρευνες έχουν δείξει ότι υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της κατανάλωσης νερού από τα φυτά και της εξάτμισης από εξατμισίμετρο τύπου Α ενώ αποτελεί την κατάλληλη και αποτελεσματική μέθοδο για την εκτίμηση της αλληλεπίδρασης νερού, φυτού και κλιματικών παραμέτρων (Ertek et al., 2006). Ο Stanhill το 2002 αναφέρει ότι σε παλαιότερη έρευνα βρέθηκε πως η εξατμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου τύπου Α ήταν σχεδόν ταυτόσημη με αυτή που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman. Οι Cohen et al. (2002) και Stanhill (2002) σε έρευνες στο Ισραήλ διαπίστωσαν στενή συσχέτιση μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής από την εφαρμογή της μεθόδου του εξατμισίμετρου τύπου Α και της συνδυασμένης μεθόδου Penman – Monteith κατά FAO. Συμπερασματικά η μέθοδος του εξατμισίμετρου τύπου Α παραμένει μια αξιόπιστη, φτηνή, άμεση και εύκολη μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται πιστή εφαρμογή των προδιαγραφών του κατασκευαστή σχετικά με την εγκατάσταση διατήρηση και διαχείρισή του.

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται γραφικά η επίδραση των κλιματικών παραμέτρων στο εξατμισίμετρο τύπου Α.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



(α)



(β)

Εικόνα 4.1: Επίδραση των κλιματικών παραμέτρων σε εξατμισίμετρο τύπου Α τοποθετημένου σε ακαλλιέργητο έδαφος (α) και σε καλλιέργεια αναφοράς (β).

4.3.1.2 Χαρακτηριστικά Εξατμισίμετρου Τύπου Α (PanA)

Τύποι εξατμισίμετρων υπάρχουν πολλοί. Σήμερα περισσότερο χρησιμοποιείται το εξατμισίμετρο τύπου Α της Αμερικανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (U.S.W.B. Class A pan) και το λιγότερο χρησιμοποιούμενο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εξατμισίμετρο του Κολοράντο (Colorado sunken pan). Το εξατμισίμετρο του Κολοράντο είναι τετράγωνο με πλευρά 92cm και βάθος 46cm και κατασκευάζεται από γαλβανισμένη λαμαρίνα. Τοποθετείται μέσα στο έδαφος έτσι ώστε το χείλος του να είναι 5cm πάνω από την επιφάνεια του περιβάλλοντος εδάφους και η στάθμη στο εσωτερικό του διατηρείται στο ίδιο επίπεδο με το έδαφος.

Σε αντίθεση με το εξατμισίμετρο του Κολοράντο, το εξατμισίμετρο τύπου Α είναι μια κυλινδρική λεκάνη. Κατασκευάζεται από χοντρή, γαλβανισμένη λαμαρίνα με διάμετρο 121cm (1207mm) και βάθος 25,4cm. Τοποθετείται πάνω σε ξύλινη βάση (ξύλινη παλέτα) κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο πυθμένας του να είναι απολύτως οριζοντιωμένος και να απέχει από την επιφάνεια του εδάφους 15cm και στη συνέχεια το έδαφος υπερυψώνεται κάτω από τη λεκάνη έτσι ώστε να απέχει τελικά 5cm από τον πυθμένα της. Στη συνέχεια η λεκάνη γεμίζεται με νερό μέχρι 5cm κάτω από το χείλος της. Η στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής δεν πρέπει να πέφτει κάτω από τα 7,5cm από το χείλος της λεκάνης (Παπαζαφειρίου, 1994, Allen et al., 1998, Goodwin, 2000, Smajstrla, 2000).

Το εξατμισίμετρο Α εφοδιάζεται με ειδικό δοχείο μέτρησης της στάθμης του νερού στο εσωτερικό του. Το δοχείο αυτό είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό κατασκευής με αυτό του εξατμισίμετρου και αποτελείται από έξι διαφορετικά μέρη, τα οποία είναι:

- ο σωλήνας του δοχείου με μήκος 230mm και διάμετρο 100mm, ο οποίος περιλαμβάνει 4 τρύπες διαμέτρου 9mm ισαπέχουσες μεταξύ τους για να μην επηρεάζεται η στάθμη μέσα στη λεκάνη,
- το καπάκι για το σφράγισμα του σωλήνα διαμέτρου 100mm για να προστατεύεται το νερό μέσα στο δοχείο μέτρησης από την επίδραση των κλιματικών παραμέτρων, το οποίο στο κέντρο του φέρει οπή 5mm και στη πάνω πλευρά του είναι μόνιμα εγκατεστημένο υποδεκάμετρο με μονάδες μέτρησης μήκους εκφρασμένες σε ίντσες και mm,
- ειδική φλάντζα κατασκευασμένη από πολυβινυλοχλωρίδιο διαμέτρου 100mm για να κλείνει αεροστεγώς το δοχείο μέτρησης,
- την κολώνα από ανοξείδωτο ατσάλι διαμέτρου 5mm και ύψους 170mm πάνω στην οποία προσαρμόζεται και κινείται κατά μήκος της η ακίδα μέτρησης της στάθμης νερού,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- την ακίδα μέτρησης στάθμης που είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να κινείται ελεύθερα κατά μήκος της μεταλλικής κολώνας και
- τον πλωτήρα στον οποίο είναι προσαρμοσμένη η ακίδα μέτρησης της στάθμης νερού (Goodwin, 2000).

4.3.1.3 Τοποθέτηση, Διατήρηση, Συντήρηση, Λήψη Μετρήσεων

Το εξατμισίμετρο τύπου Α πρέπει να τοποθετείται πάνω σε καλλιέργεια αναφοράς ή τουλάχιστο 10m από καλλιεργημένο έδαφος ενώ πρέπει να περιβάλλεται από φράχτη για να προστατεύεται από τις επισκέψεις ζώων (Allen et al., 1998). Το εξατμισίμετρο πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση από κτήρια, λοιπές κατασκευές, δέντρα και οτιδήποτε είναι πιθανό να προκαλέσει σκίαση. Πρέπει να τοποθετείται σε υπήνεμη θέση στην οποία επικρατούν οι τυπικές κλιματικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής. Δεν πρέπει να τοποθετείται απευθείας σε τσιμέντο, άσφαλτο ή βράχο ενώ όταν τοποθετείται σε ακαλλιέργητο έδαφος τα ζιζάνια θα πρέπει να διατηρούνται σε ύψος χαμηλότερο από αυτό στο οποίο βρίσκεται το εξατμισίμετρο. Πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάστασή του σε θέσεις όπου υπάρχει πιθανότητα να πραγματοποιηθεί ακούσια εισροή νερού στη λεκάνη του εξατμισίμετρου (Novalynx Corporation, 2007).

Για τη συντήρηση και διατήρηση του εξατμισίμετρου τύπου Α πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα. Το εξατμισίμετρο πρέπει να διατηρείται βαμμένο στο χρώμα του (ασημί μεταλλικό) ενώ θα πρέπει να αποφεύγεται να βάφεται σε μαύρο χρώμα γιατί επηρεάζεται η εξάτμιση. Αντίθετα όταν επιλέγεται το λευκό χρώμα μικρή επίδραση παρατηρείται στην εξάτμιση. Θα πρέπει να αποφεύγεται να χρησιμοποιούνται λάδια και διαφόρων ειδών γράσα γιατί επηρεάζουν την εξάτμιση. Προστασία από τα άλγη προσφέρει η χρήση ορυκτού θεϊκού χαλκού σε ποσότητα 5-10ppm/L νερού στη λεκάνη του εξατμισίμετρου ή η χρήση ειδικών αλγοκτόνων. Η ανανέωση του νερού της λεκάνης και ο σχολαστικός καθαρισμός της θα πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε μήνα (Allen et al., 1998, Goodwin, 2000, Smajstrla, 2000). Ωστόσο, η καθημερινή πρακτική δείχνει ότι ο καθαρισμός του εξατμισίμετρου πρέπει να γίνεται κάθε 20 ημέρες περίπου.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την συλλογή των μετρήσεων εξάτμισης από εξατμισίμετρο τύπου Α. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται το πρωί την ίδια πάντα ώρα (9π.μ). Η πλήρωση του εξατμισίμετρου με ογκομετρικό δοχείο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ελαχιστοποιεί τα σφάλματα μέτρησης. Από το εξατμισίμετρο, σύμφωνα με τις διαστάσεις του, απομακρύνονται 1,14L νερού για κάθε mm πτώσης της στάθμης του. Επομένως, ένα ογκομετρικό δοχείο που χωρά 2,28L νερού είναι κατάλληλο για την πλήρωση του εξατμισίμετρου. Η στάθμη του νερού εντός της λεκάνης πρέπει να διατηρείται στο ύψος που προαναφέρθηκε γιατί διαφορετικά το σφάλμα στη μέτρηση της εξάτμισης είναι σημαντικό. Έτσι κάθε φορά που επιβάλλεται πλήρωση του εξατμισίμετρου πρέπει η αντίστοιχη ποσότητα νερού, η οποία αποτελεί την εξάτμιση, να συμπληρώνεται έως την ένδειξη **Ο** της ράβδου ένδειξης (Goodwin, 2000, Smajstrla, 2000).

Στις περιπτώσεις βροχοπτώσεων απαιτείται ιδιαίτερος χειρισμός. Όταν παρατηρηθεί βροχόπτωση τότε θα πρέπει η λήψη της μέτρησης να γίνει ταυτόχρονα με την μέτρηση του ύψους της βροχόπτωσης. Στις περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων, οπότε παρατηρείται υπερχείλιση της λεκάνης του εξατμισίμετρου, τότε με το ογκομετρικό δοχείο αφαιρούμε νερό έως το σημείο **Ο**. Η εξάτμιση τότε είναι η διαφορά μεταξύ του ύψους βροχής και της ποσότητας νερού που αφαιρέθηκε. Στις περιπτώσεις που η βροχόπτωση είναι μικρή τότε προστίθεται νερό έως την ένδειξη **Ο** και η εξάτμιση προκύπτει από το άθροισμα του ύψους βροχής με την ποσότητα νερού που προστέθηκε στο εξατμισίμετρο (Goodwin, 2000).

Εικόνα 4.2: Μετεωρολογικός σταθμός και εξατμισίμετρο τύπου Α.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

4.3.1.4 Διαδικασία Υπολογισμού της ETo με τη Χρήση Υπολογιστικού Φύλλου

Εκτός από τη διαδικασία λήψης μετρήσεων, η μέθοδος του εξατμισίμετρου απαιτεί τη γνώση του συντελεστή εξατμισίμετρου (Kpan). Ο συντελεστής Kpan διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης του εξατμισίμετρου, εγκατάσταση σε έδαφος που καλύπτεται από καλλιέργεια αναφοράς ή εγκατάσταση σε ακαλλιέργητο έδαφος το οποίο περιβάλλεται από καλλιέργειες. Για τον υπολογισμό του Kpan έχουν διατυπωθεί διάφορες εξισώσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την θέση εγκατάστασης του εξατμισίμετρου και ορισμένους κλιματικούς παράγοντες της περιοχής όπως η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Από τις εξισώσεις που διαμορφώθηκαν οι πλέον ακριβείς στον υπολογισμό του Kpan αναφέρονται παρακάτω.

Στην περίπτωση που το εξατμισίμετρο τοποθετείται σε έκταση που καλύπτεται από καλλιέργεια αναφοράς οι Allen et al., (1998) προτείνουν την εξίσωση:

$$Kp = 0{,}108 - 0{,}0286u_2 + 0{,}0422\ln(FET) + 0{,}1434\ln(RH_{mean}) - 0{,}00063\,1[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean}) \quad (4.1)$$

Στην περίπτωση που το εξατμισίμετρο τοποθετείται σε ακαλλιέργητη έκταση που περιβάλλεται από καλλιέργεια αναφοράς οι Allen et al., (1998) προτείνουν την εξίσωση:

$$Kp = 0{,}61 + 341\times10^{-5}RH_{mean} - 162\times10^{-6}u_2RH_{mean} - 959\times10^{-8}u_2FET + 327\times10^{-5}u_2\ln(FET) - 289\times10^{-5}u_2\ln(86.4u_2) - 106\times10^{-4}\ln(86.4u_2)\ln(FET) + 63\times10^{-5}[\ln(FET)]^2\ln(86.4u_2) \quad 4.2)$$

Οι Snyder (1992) και Gundekar et al. (2008) προτείνουν η εξίσωση:

$$Kp = 0{,}482 + 24\times10^{-2}\ln(FET) - 376\times10^{-6}u_2 + 45\times10^{-4}RH_{mean} \quad (4.3)$$

να εφαρμόζεται σε ημιξηρικά κλίματα με μέση ετήσια βροχόπτωση 850mm και σε περιπτώσεις που το εξατμισίμετρο εγκαθίσταται σε ακαλλιέργητο έδαφος.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 4.2 για τον υπολογισμό του Kpan υπό τις κλιματικές και καλλιεργητικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Ο υπολογισμός τόσο του συντελεστή εξατμισίμετρου όσο και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου MsExcel. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιούνταν ημερησίως έτσι ώστε να

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

υπολογίζονται οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό ανά ημέρα και το εύρος άρδευσης να είναι δύο ημέρες. Τα απαιτούμενα δεδομένα περιλαμβάνουν:

- την ταχύτητα του ανέμου (u_2) εκφρασμένη σε m/s, η οποία μετράται σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους,
- την μέση σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας (RH_{mean}) εκφρασμένη ως ποσοστό επί τοις εκατό,
- την απόσταση της υπήνεμης πλευράς του εξατμισίμετρου από έκταση που καλύπτεται από χαμηλή βλάστηση (FET) εκφρασμένη σε m. Στην παρούσα έρευνα FET = 10m.

Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα ταχύτητας ανέμου και σχετικής υγρασίας τότε ο Kpan δίνεται από πίνακες. Ο Πίνακας 4.1 δίνει τιμές του Kpan για διάφορες περιπτώσεις.

Πίνακας 4.1: Συντελεστές εξατμισίμετρου για διαφορετικές θέσεις και κλιματικές συνθήκες (Allen et al., 1998)

K_{pan} ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟΥ ΤΥΠΟΥ Α							
Απόσταση Προσήνεμης Πλευράς από Καλλιέργεια (m)		Τοποθέτηση σε Καλλιέργεια Αναφοράς			Τοποθέτηση σε Ακαλλιέργητη Έκταση		
	RH_{mean} (%)	<40%	40-70%	>70 %	<40%	40-70%	>70%
	u_2 (m/s)						
1	Ασθενής	0,55	0,65	0,75	0,70	0,80	0,85
10	<2	0,65	0,75	0,85	0,60	0,70	0,80
100		0,70	0,80	0,85	0,55	0,65	0,75
1000		0,75	0,85	0,85	0,50	0,60	0,70
1	Μέτριος	0,50	0,60	0,65	0,65	0,75	0,80
10	2-5	0,60	0,70	0,75	0,55	0,65	0,70
100		0,65	0,75	0,80	0,50	0,60	0,65
1000		0,70	0,80	0,80	0,45	0,55	0,60
1	Ισχυρός	0,45	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70
10	5-8	0,55	0,60	0,65	0,50	0,55	0,65
100		0,60	0,65	0,70	0,45	0,50	0,60
1000		0,65	0,70	0,75	0,40	0,45	0,55
1	Πολύ	0,40	0,45	0,50	0,50	0,60	0,65
10	Ισχυρός	0,45	0,55	0,60	0,45	0,50	0,55
100	>8	0,50	0,60	0,65	0,40	0,45	0,50
1000		0,55	0,60	0,65	0,35	0,40	0,45

Από τη στιγμή που υπολογιστεί ο Kpan μιας περιοχής ή γίνει γνωστός από πίνακα τότε ακολουθεί ο υπολογισμός της ETo. Για τον υπολογισμό της εφαρμόζεται η παρακάτω εξίσωση (Snyder, 1992, Παπαζαφειρίου, 1994, Allen et al., 1998).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ETo = Kpan x Epan (4.4)

Όπου: ETo είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/d),

Kpan είναι ο συντελεστής εξατμισίμετρου (αδιάστατος) και

Epan είναι η εξάτμιση από το εξατμισίμετρο τύπου Α (mm).

4.4. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ (ET_C)

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας υπό κανονικές συνθήκες (ETc). Οι κανονικές συνθήκες αναφέρονται σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε άριστες αγρονομικές συνθήκες και συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Υπενθυμίζεται ότι οι μεταχειρίσεις Α100, Ε100 και Υ100 δέχτηκαν πλήρη άρδευση ενώ η καλλιέργεια διατηρήθηκε σε άριστη αγρονομική κατάσταση (απουσία μυκητολογικών και εντομολογικών προσβολών) και επομένως ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις υπολογισμού της ETc.

4.4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ET_C

4.4.1.1 Μέθοδος του Φυτικού Συντελεστή

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας διαφέρει από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σαν συνέπεια των διαφορών που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά της, μορφολογικά και φυσιολογικά, από αυτά της καλλιέργειας αναφοράς. Η διαφοροποίηση της ETc από την ETo εκφράζεται από το φυτικό συντελεστή Kc κατά τρόπο που να διαμορφώνεται η γενική σχέση:

ETc = Kc x ETo (4.5)

Όπου: ETc είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm/d),

Kc είναι ο φυτικός συντελεστής (αδιάστατος) και

ETo είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/d).

Οι φυτικοί συντελεστές προσδιορίζονται πειραματικά, διαφέρουν από καλλιέργεια σε καλλιέργεια αλλά και για την ίδια καλλιέργεια διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου (Παπαζαφειρίου, 1997, Allen et al. 1998).

4.4.1.2 Μέθοδος Άμεσου Υπολογισμού

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας μπορεί να μετρηθεί στον αγρό από μετρήσεις της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας με την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας και με λυσίμετρα. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μέθοδος είναι αυτή των διαδοχικών δειγματοληψιών, του υδατικού ισοζυγίου και η μέθοδος του λυσίμετρου (Παπαζαφειρίου 1997). Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μέτρησης υγρασίας εδάφους η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην αρχή της δημιουργίας και διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από ηλεκτρόδια. Ο αισθητήρας αυτός αποτελούσε μέρος ευφυούς συστήματος άρδευσης τα χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.4.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΦΥΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ

Η εξατμισοδιαπνοή, όπως ορίστηκε στα προηγούμενα, αντιπροσωπεύει την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς. Οι φυτικοί συντελεστές αντιπροσωπεύουν την διαφοροποίηση της εξατμισοδιαπνοής μιας οποιασδήποτε άλλης καλλιέργειας από την καλλιέργεια αναφοράς. Οι φυτικοί συντελεστές διαφέρουν ανάλογα με την καλλιέργεια και παρουσιάζουν διακύμανση κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Οι τιμές τους διαμορφώνονται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε καλλιέργειας, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που αναπτύσσεται, την καλλιεργητική πρακτική και τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Για τις ετήσιες καλλιέργειες, επιπρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν τον Kc είναι ο χρόνος σποράς ή φύτευσης, ο ρυθμός ανάπτυξης και η συχνότητα των βροχοπτώσεων και των αρδεύσεων κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Στις πολυετείς χορτοδοτικές καλλιέργειες ο Kc επηρεάζεται από τον αριθμό των κοπών. Λόγω των διαφοροποιήσεων αυτών η διερεύνηση των φυτικών συντελεστών γίνεται κατά κατηγορίες καλλιεργειών (Παπαζαφειρίου, 1997). Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε το ετήσιο εαρινό φυτό σόργο και επομένως θα ακολουθήσει ανάλυση του φυτικού συντελεστή ετήσιων καλλιεργειών.

4.4.2.1 Στάδια Ανάπτυξης Καλλιέργειας

Οι ετήσιες καλλιέργειες παρουσιάζουν διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών τους, κυρίως ως προς το ποσοστό κάλυψης του εδάφους κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Αποτέλεσμα αυτής της διαφοροποίησης είναι κάθε φυτικό στάδιο να χαρακτηρίζεται από διαφορετικό φυτικό συντελεστή και επομένως διαφορετική εξατμισοδιαπνοή.

Στάδιο 1°: Περίοδος εγκατάστασης της καλλιέργειας. Χρονικά το στάδιο αυτό τοποθετείται την περίοδο σποράς ή φύτευσης της καλλιέργειας και διαρκεί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

τόσο όσο απαιτείται τα φυτά να καλύψουν ποσοστό έως 10% της επιφάνειας του εδάφους. Στο στάδιο αυτό η εξατμισοδιαπνοή προέρχεται κατά περίπου 90% από την εξάτμιση του νερού από το έδαφος και κατά 10% από τη διαπνοή από τους φυτικούς ιστούς και αυξάνεται όταν οι βροχοπτώσεις και/ή οι αρδεύσεις είναι συχνές. Η τιμή του Kc για όλο το στάδιο 1 θεωρείται σταθερή.

Στάδιο 2^{ο}: Περίοδος κύριας ή ταχείας ανάπτυξης. Χρονικά το στάδιο αυτό τοποθετείται την περίοδο που το ποσοστό φυτοκάλυψης του εδάφους είναι 10% και διαρκεί όλη την περίοδο έντονης ανάπτυξης του φυτού έως ότου η φυτοκάλυψη του εδάφους γίνει πλήρης (70-90%). Η τιμή του Kc στο στάδιο 2 δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής (που είναι ο Kc του προηγούμενου σταδίου) και μιας μέγιστης (που είναι ο Kc_{max} για την περιοχή).

Στάδιο 3^{ο}: Στάδιο διαμόρφωσης της παραγωγής ή στάδιο μέσης περιόδου. Χρονικά το στάδιο αυτό τοποθετείται την περίοδο ανθοφορίας και σχηματισμού των καρπών. Η τιμή του Kc στο στάδιο 3 είναι σταθερή και ίση με την μέγιστη τιμή του Kc (ποσοστό φυτοκάλυψης 100%) ενώ προσδιορίζεται πειραματικά για κάθε καλλιέργεια και περιοχή γιατί οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την διαμόρφωσή τους.

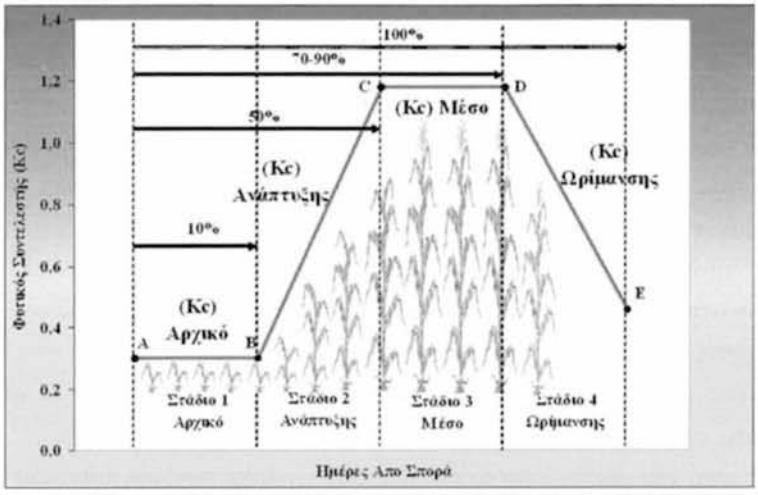
Στάδιο 4^{ο}: Περίοδος ωρίμανσης. Χρονικά το στάδιο αυτό τοποθετείται κατά την περίοδο που πραγματοποιείται η ωρίμανση των καρπών και ολοκληρώνεται με την συγκομιδή. Η τιμή του Kc στο στάδιο 4 δεν είναι σταθερή και προσδιορίζεται πειραματικά για κάθε καλλιέργεια και περιοχή.

Για την καλλιέργεια του σόργου στην περιοχή Βελεστίνου (βιολογικός κύκλος 130 ημέρες από την πλήρη εγκατάσταση των φυτών), σύμφωνα με τις καλλιεργητικές, αρδευτικές και λοιπές τεχνικές διαχείρισης της καλλιέργειας, η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης είναι:

- στάδιο 1^{ο}: 0-33 ημέρες από τη σπορά.,
- στάδιο 2^{ο}: 34-61 ημέρες από τη σπορά,
- στάδιο 3^{ο}: 62-110 ημέρες από τη σπορά και
- στάδιο 4^{ο}: 111-145 ημέρες από τη σπορά.

Στην πραγματικότητα οι φυτικοί συντελεστές παρουσιάζουν μια συνεχή μεταβολή από το φύτρωμα μέχρι τη συγκομιδή και έχουν τη μορφή της Εικόνας 4.3 (Παπαζαφειρίου, 1997, Allen et al., 1998, Bos et al., 2009).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 4.3: Διακύμανση φυτικού συντελεστή Kc καλλιέργειας σόργου κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου.

4.4.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ K_C

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίζεται, όπως προαναφέρθηκε, πολλαπλασιάζοντας την ETo με τον Kc, δηλαδή το συντελεστή που εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της καλλιεργούμενης επιφάνειας και της επιφάνειας της καλλιέργειας αναφοράς. Για τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή έχουν διατυπωθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού τόσο του απλού φυτικού συντελεστή όσο και του διπλού. Ο απλός φυτικός συντελεστής εκφράζει τόσο την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους όσο και την διαπνοή από τους φυτικούς ιστούς.

4.4.3.1 Υπολογισμός του Διπλού Φυτικού Συντελεστή (K_{cd})

Ο διπλός φυτικός συντελεστής αποτελείται από δύο επιμέρους φυτικούς συντελεστές. Από αυτούς ο ένας εκφράζει την εξάτμιση (soil evaporation coefficient, Ke) και ο δεύτερος την διαπνοή (βασικός φυτικός συντελεστής, Kcb). Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις (Allen et al., 1998).

$$Kc = Kcb + Ke \tag{4.6}$$

$$Kcb = Kcb_{(\Pi\Pi N.)} + [0{,}04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)]\left(\frac{h_c}{3}\right)^{0.3} \tag{4.7}$$

$$Ke = Kr(Kc_{\max} - Kcb) \le f_{ew} Kc_{\max} \tag{4.8}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$Kc_{max} = \max\left\langle \left\{ 1.2 + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h_c}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{Kcb + 0.05\} \right\rangle \qquad (4.9)$$

Όπου: **Kcb**: βασικός φυτικός συντελεστής (αδιάστατος),

$Kcb_{(III\Pi.)}$: βασικός φυτικός συντελεστής του 3ου σταδίου ανάπτυξης (Kc mid) ή ο βασικός συντελεστής του 4ου σταδίου ανάπτυξης (Kc end), (αν είναι ≥0,45) λαμβάνεται από πίνακα (FAO 56)

U_2: μέση τιμή της ημερήσιας ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2m πάνω από την επιφάνεια της καλλιέργειας αναφοράς κατά το στάδιο μέσης ή τελικής περιόδου ανάπτυξης όταν $1m/s \leq U_2 \leq 6m/s$, (m/s),

RH_{min}: μέση τιμή της ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας κατά το στάδιο μέσης ή τελικής περιόδου ανάπτυξης όταν $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$, (%),

h_c: μέσο ύψος φυτών κατά το στάδιο μέσης ή τελικής περιόδου ανάπτυξης (από FAO 56) όταν $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$, (m).

Ke: συντελεστής εξάτμισης του εδαφικού νερού (αδιάστατος),

Kc_{max}: μέγιστη τιμή του Kc μετά από βροχόπτωση ή άρδευση,

Kr: συντελεστής μείωσης της εξάτμισης που εξαρτάται από το αθροιστικό ύψος νερού που απομακρύνθηκε από το επιφανειακό έδαφος,

f_{ew}: το τμήμα του εδάφους που διαβρέχεται ή εκτίθεται άρδευση ή βροχόπτωση και δίνεται από την σχέση $f_{ew}=\min(1-fc, fw)$ όπου ο παράγοντας 1-fc (0,01-1) εκφράζει το ποσοστό του εδάφους που δεν σκιάζεται ή δεν φυτοκαλύπτεται και ο παράγοντας fw εκφράζει το τμήμα του εδάφους που διαβρέχεται από άρδευση ή βροχόπτωση (0,01-1).

max: η μέγιστη τιμή των παραμέτρων στις αγκύλες,

min: η ελάχιστη τιμή μεταξύ των παραγόντων 1-fc και fw.

Ο βασικός φυτικός συντελεστής (Kcb) ορίζεται ως ο λόγος της ETc προς την ETo όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι ξηρή και επομένως η εξάτμιση από αυτή ελάχιστη, αλλά η εδαφική υγρασία δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ο συντελεστής εξάτμισης του εδάφους (Ke) υπολογίζεται έμμεσα από το εδαφικό νερό που παραμένει στο επιφανειακό έδαφος. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στον προσδιορισμό του ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου. Ο διπλός φυτικός συντελεστής χρησιμοποιείται στον προγραμματισμό αρδεύσεων με μικρό εύρος άρδευσης, σε λεπτομερείς μελέτες ισοζυγίων εδαφικού

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

νερού και σε υδρολογικές μελέτες. Για τον υπολογισμό απαιτούνται πολλαπλοί ημερήσιοι υπολογισμοί και η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (Allen et al., 1998).

4.4.3.2 Υπολογισμός Απλού Φυτικού Συντελεστή (Kc)

Ο απλός φυτικός συντελεστής εκφράζει τη διαφοροποίηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ETc) από αυτή της καλλιέργειας αναφοράς. Χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, διαχείριση και προγραμματισμό των αρδεύσεων χαμηλής συχνότητας. Για τον υπολογισμό του απαιτείται να είναι γνωστή η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και όταν είναι γνωστές αυτές οι δύο παράμετροι ο Kc προκύπτει από το πηλίκο της ETc δια την ETo (Παπαζαφειρίου1994, Tyagi et al., 2001). Ο υπολογισμός του Kc γίνεται ανά δεκαήμερο ή ανά μήνα και για τους υπολογισμούς απαιτούνται αριθμομηχανή και ηλεκτρονικός υπολογιστής (Allen et al., 1998). Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται είτε με τη χρήση εξισώσεων (μέθοδοι Penman – Monteith, τροποποιημένη μέθοδος Penman – Monteith κατά FAO, κ.α.) είτε με την χρήση του εξατμισίμετρου. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίζεται έμμεσα από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, η οποία είναι:

$$ETc = I + Pe + Cr - (RO + DP) \pm SMD \qquad (4.10)$$

Όπου: I: ποσότητα νερού που προστίθεται στο έδαφος με άρδευση (mm),

Pe: ωφέλιμη ποσότητα νερού που προστίθεται στο έδαφος με βροχόπτωση (mm),

RO: ποσότητα νερού που απομακρύνεται από το έδαφος με επιφανειακή απορροή (mm),

DP: ποσότητα νερού που απομακρύνεται από το έδαφος με βαθιά διήθηση (mm),

Cr: συμβολή του υπόγειου νερού (mm) και

SMD: διαφορά υγρασίας στο έδαφος μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων με την χρήση αισθητήρων (Soil Moisture Difference, mm). Όταν η διαφορά της πρώτης από την δεύτερη μέτρηση είναι αρνητική τότε στον τύπο 4.10 η τιμή της SMD λαμβάνεται με αρνητικό πρόσημο ενώ όταν η διαφορά αυτή είναι θετική λαμβάνεται με θετικό πρόσημο (James, 1988, Παπαζαφειρίου, 1994, Mastrorilli et al., 1995, Itier et al., 1997, Ertek, 2006).

Από την ποσότητα νερού που προστίθεται στο έδαφος με βροχόπτωση (Pe) μόνο ένα μέρος αποθηκεύεται σε αυτό. Το υπόλοιπο μέρος του ύψους βροχής χάνεται λόγω εξάτμισης, επιφανειακής απορροής, βαθιάς διήθησης και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εξατμισοδιαπνοής (Bos et al., 2009). Όταν το ύψος βροχής είναι περίπου 20% της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς τότε θεωρείται αμελητέα. Όταν το ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο τότε η ποσότητα νερού που χάνεται ως επιφανειακή απορροή (run off, RO) εξαρτάται από την ένταση της βροχής, την κλίση του αγρού, τον τύπο του εδάφους και τις υδραυλικές του ιδιότητες, την ποσότητα νερού που είναι ήδη αποθηκευμένη στο έδαφος και από το ποσοστό εδαφοκάλυψης. Γενικά η επιφανειακή απορροή μπορεί να θεωρηθεί μηδέν ή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί ποσοστό της Pe γιατί κατά τις περιπτώσεις βροχοπτώσεων μεγάλης έντασης και ύψους βροχής (ικανές να προκαλέσουν απώλεια νερού λόγω επιφανειακής απορροής) το επιφανειακό στρώμα εδάφους αναπληρώνει την υγρασία του έως την υδατοϊκανότητα (Allen et al., 1998). Στην παρούσα έρευνα η βροχόπτωση οποτεδήποτε και αν συνέβη, κατά την βλαστική περίοδο, πολλαπλασιάστηκε με ένα συντελεστή ωφελιμότητας 0,8 οπότε το υπόλοιπο θεωρήθηκε απώλεια λόγω εξάτμισης κυρίως.

Σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης ή άρδευσης, η περιεχόμενη υγρασία του επιφανειακού εδάφους είναι πιθανό να υπερβεί την υδατοϊκανότητα. Σε αυτή την περίπτωση μια ποσότητα νερού επιπλέον της επιφανειακής απορροής χάνεται ως βαθιά διήθηση (deep percolation, DP) (Allen et al., 1998). Στην παρούσα έρευνα η βαθιά διήθηση θεωρήθηκε αμελητέα γιατί σύμφωνα με τις μετρήσεις της υγρασίας εδάφους, αυτή δεν ξεπέρασε την υδατοϊκανότητα στο βάθος του ενεργού ριζοστρώματος.

Η συμβολή του υπόγειου νερού (capillary rise, Cr) συνήθως θεωρείται αμελητέα. Όταν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μικρότερο των τριών μέτρων και το έδαφος έχει καλή δομή τότε παρατηρείται ανύψωση του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων. Όταν παρατηρείται το φαινόμενο αυτό, ο συνολικός όγκος νερού που υφίσταται τριχοειδή ανύψωση συμβάλει σημαντικά στην διύγρανση του ριζοστρώματος και επομένως στην κάλυψη μέρους από τις ανάγκες των φυτών σε νερό (Bos et al., 2009).

Για τον υπολογισμό των αρδεύσεων απαιτείται η γνώση της ποσότητας του νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος μεταξύ της υδατοϊκανότητας (FC) και του σημείου μόνιμης μάρανσης (PWP). Η ποσότητα αυτή του νερού ονομάζεται διαθέσιμη υγρασία (Available Soil Moisture, ASM) και υπολογίζεται από τη σχέση:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$ASM = \frac{FC - PWP}{100} \times ASW \times RD \quad (4.11)$$

Όπου: ASM: διαθέσιμη υγρασία εδάφους (mm),

FC: υδατοϊκανότητα του εδάφους (%κ.β.),

PWP: σημείο μόνιμης μάρανσης (%κ.β.),

ASW: φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους. Προκύπτει από το πηλίκο της διαίρεσης της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους (Bulk Density, Bd) η οποία εκφράζεται σε gr/cm^3 δια την πυκνότητα του νερού ($1gr/cm^3$), (αδιάστατο),

RD: βάθος ριζοστρώματος (mm).

Η διαθέσιμη υγρασία επηρεάζεται κυρίως από τη δομή και την υφή του εδάφους. Γενικά, τα αμμώδη (ελαφρά) εδάφη επειδή στραγγίζουν καλά έχουν μικρή διαθέσιμη υγρασία (70-100mm/m), ακολουθούν τα ιλυώδη (μέσης σύστασης) με διαθέσιμη υγρασία 100-150mm/m και τέλος τα αργιλώδη (συνεκτικά) με διαθέσιμη υγρασία 150-200mm/m. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και πρέπει πάντοτε για τον ορθό προγραμματισμό των αρδεύσεων να υπολογίζεται η διαθέσιμη υγρασία του προς άρδευση αγρού. Η σχέση 4.11 χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις ομογενών εδαφών. Στην πράξη όμως τα γεωργικά εδάφη είναι διαστρωμένα και επομένως η διαθέσιμη υγρασία θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε στρώμα χωριστά. Τα Ελληνικά εδάφη παρουσιάζουν διαφορετική διαστρωμάτωση ανά 30cm περίπου Ωστόσο, οι καλλιέργειες μπορούν να χρησιμοποιήσουν άμεσα μέρος της ASM. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ωφέλιμη υγρασία και δίνεται από την σχέση:

$$USM = F \times ASM \quad (4.12)$$

Όπου: USM: ωφέλιμη υγρασία (mm) και

F: συντελεστής ωφελιμότητας (αδιάστατος)

Ο συντελεστής ωφελιμότητας επηρεάζεται από φυτικούς, εδαφικούς και κλιματικούς παράγοντες ενώ οι τιμές του κυμαίνονται από 0,30-0,65 σε συνθήκες που ευνοούν τον περιορισμό της ωφέλιμης υγρασίας και μπορεί να φτάσει την τιμή 0,75 όταν οι συνθήκες ευνοούν την αυξημένη ωφέλιμη υγρασία. Η ωφέλιμη υγρασία είναι η ποσότητα του νερού που πρέπει να αποθηκευτεί στο έδαφος με κάθε άρδευση (Παπαζαφειρίου, 1994).

Για κάθε ποσοτική εκτίμηση του ωφέλιμου στα φυτά νερού είναι απαραίτητο ο μελετητής να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά του ριζοστρώματος. Η κατανομή, η πυκνότητα και το βάθος του κύριου όγκου των ριζών είναι μερικά από τα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

χαρακτηριστικά που πρέπει να είναι γνωστά για τον υπολογισμό της διαθέσιμης υγρασίας. Η ζώνη του ριζοστρώματος καθορίζει κατά κύριο λόγο το μέγεθος της εδαφικής δεξαμενής που περιέχει το χρήσιμο για τις καλλιέργειες νερό. Στα περισσότερα φυτά οι ρίζες τους είναι συγκεντρωμένες στο επάνω μέρος της ζώνης του ριζοστρώματος κοντά στη βάση του φυτού. Στο σόργο έχει βρεθεί ότι οι ρίζες του φτάνουν σε βάθος έως και 180cm (Dercas et al., 1999) ενώ για το καλαμπόκι (συγγενές προς το σόργο φυτό) έχει βρεθεί ότι οι ρίζες του μπορεί να φτάσουν στα ίδια επίπεδα βάθους (Παπαζαφειρίου, 1994). Στην παρούσα έρευνα το μέσο βάθος του ενεργού ριζοστρώματος θεωρήθηκε ότι ήταν 600cm τιμή που προέκυψε μετά από διάνοιξη φρεατίου και παρατηρήθηκε την 61η ημέρα μετά την σπορά.

Με βάση την παραπάνω σχέση 4.11 πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της SMD μεταξύ διαδοχικών αρδεύσεων. Αναλυτικότερα, αντί της FC και του PWP χρησιμοποιούνταν οι τιμές της εδαφικής υγρασίας που καταγράφονταν από τους αισθητήρες πριν από κάθε άρδευση. Με βάση αυτές τις μετρήσεις υπολογίζονταν η ποσότητα του νερού που αποθηκεύονταν ή έλλειπε από το έδαφος. Γνωρίζοντας την ποσότητα του νερού που χορηγήθηκε με άρδευση και το ωφέλιμο ύψος βροχής (βροχόπτωση επί συντελεστή ωφελιμότητας) και λαμβάνοντας υπόψη ότι η συμβολή του υπόγειου νερού και η βαθιά διήθηση ήταν αμελητέες υπολογίστηκε η ETc. Με την εφαρμογή της σχέσης 4.5 προσδιορίστηκε ο φυτικός συντελεστής των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν ελλειμματικά κάθε 11 ημέρες.

4.4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ET_C – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΟΣΕΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Ο υπολογισμός της ETc γίνεται σε τέσσερα στάδια με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου MsExcel.

Βήμα 1ο: Αρχικά υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με την χρήση εξατμισίμετρου τύπου Α, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3.1.4.

Βήμα 2ο: Καθορίζονται τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.4.2.1.

Βήμα 3ο: Υπολογίζεται ο απλός φυτικός συντελεστής, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.4.3.2. ή λαμβάνεται από πίνακες.

Βήμα 4ο: Υπολογίζεται η ETc από την εξίσωση 4.5.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ETc εκφράζει τις απώλειες μιας καλλιέργειας σε νερό. Επομένως η αρδευτική δόση θα πρέπει να είναι τουλάχιστο όση και οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

απώλειες αυτές. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε η συνολική ποσότητα νερού που θα εφαρμοστεί στον αγρό να καλύπτει τις διάφορες απώλειες. Στον όρο «απώλειες» περιλαμβάνονται οι πραγματικές απώλειες του συστήματος άρδευσης, μια ποσότητα νερού η οποία προορίζεται για έκπλυση αλάτων και μια επιπλέον ποσότητα νερού από πιθανά σφάλματα μέτρησης της εξάτμισης από το εξατμισίμετρο τύπου Α λόγω της σκίασης που προκαλούσε ένα προστατευτικό δίχτυ που σκέπαζε τη λεκάνη του εξατμισίμετρου έτσι ώστε να αποφεύγεται η κάθοδος πτηνών και η αφαίρεση νερού από αυτή. Συνολικά οι «απώλειες» αυτές ενσωματώθηκαν σε ένα συντελεστή 0,09. Ο συντελεστής αυτός ενσωματώθηκε στο συντελεστή εξατμισίμετρου (Kpan) ο οποίος διαμορφώθηκε στο 0,77 (πραγματική τιμή Kpan = 0,68 όπως προκύπτει από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την περιοχή του Βελεστίνου). Έτσι η δόση άρδευσης για τις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως υπολογίστηκε από την σχέση:

$$Dn = \frac{(Kpan + 0{,}04) \times Epan \times Kc - Pe}{Ed} \qquad (4.13)$$

Όπου: Dn: η δόση άρδευσης για τις πλήρως αρδευόμενες μεταχειρίσεις (Υ100 και Ε100) (mm),

Kpan: είναι ο συντελεστής εξατμισίμετρου (αδιάστατος),

Epan: είναι η ημερήσια εξάτμιση από το εξατμισίμετρο τύπου Α (mm),

Kc: είναι ο φυτικός συντελεστής της καλλιέργειας (αδιάστατος),

Pe: ωφέλιμη βροχόπτωση (mm) και

Ed: βαθμός απόδοσης του συστήματος στάγδην άρδευσης (Ed=0,95, αδιάστατος).

Η δόση άρδευσης για τις ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις (Ε70, Υ70, Ε50 και Υ50) ήταν το γινόμενο του Dn επί τους συντελεστές 0,7 και 0,5 οι οποίοι εξέφραζαν το 70% και 50% των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό, αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας στάγδην άρδευσης απαιτείται να είναι γνωστό το ωριαίο ύψος βροχής που εφαρμόζεται από το σύστημα άρδευσης που χρησιμοποιείται. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος άρδευσης (στάγδην) που πρέπει να γνωρίζει ο μελετητής για να υπολογίσει το ωριαίο ύψος βροχής είναι:

- η παροχή του κάθε σταλάκτη (L/h),
- ο αριθμός σταλακτήρων ανά φυτό (αδιάστατος) και
- η ισαποχή των σταλακτήρων επί του σταλακτηφόρου σωλήνα (m).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Επιπλέον των παραπάνω στοιχείων απαιτείται η γνώση των αποστάσεων σποράς ή φύτευσης και η πυκνότητα φύτευσης (αριθμός φυτών επί της γραμμής σποράς). Επομένως, όταν είναι γνωστές οι παραπάνω παράμετροι, η διάρκεια άρδευσης και το ωριαίο ύψος βροχής υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$t = \frac{Dn}{Dh} \tag{4.14}$$

$$Dh = \frac{q \times n}{St \times Sr} \tag{4.15}$$

Όπου: t: η διάρκεια άρδευσης (h),

Dn: η δόση άρδευσης (mm),

Dh: το ωριαίο ύψος βροχής (mm/h),

q: παροχή σταλάκτη (L/h),

St: η ισαποχή των φυτών επί της γραμμής σποράς ή φύτευσης (m),

Sr: η ισαποχή των γραμμών σποράς ή φύτευσης (m),

n: αριθμός σταλακτήρων ανά δύο γραμμές φυτών, ο οποίος δίνεται από τη σχέση

$$n = \frac{St}{2 \times Se} \tag{4.16}$$

Se: είναι η ισαποχή των σταλακτήρων επί του σταλακτηφόρου σωλήνα (αδιάστατος).

Ο αριθμός των αρδεύσεων καθορίστηκε με βάση την πρακτική της υψηλής συχνότητας άρδευσης και σύμφωνα με αυτή το εύρος άρδευσης ήταν δύο ημέρες. Η συχνή στάγδην άρδευση (1 έως 3 αρδεύσεις ανά εβδομάδα) δεν επηρέασαν την παραγωγή καρποδοτικού σόργου (Ravelo et al., 1977, Faci and Fereres, 1980). Η συχνή άρδευση (εύρος άρδευσης 3,5 ημέρες) με συστήματα άρδευσης υψηλής ακρίβειας τα οποία εφαρμόζουν το νερό άρδευσης υπό χαμηλή πίεση είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής καρποδοτικού σόργου (Bordovsky and Lyle, 1996) ενώ σε καλλιέργεια τομάτας η συχνή υπόγεια στάγδην άρδευση είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής (Phene et al., 1987).

4.4.5. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΦΥΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην περίπτωση της μεταχείρισης A100, η διάρκεια και η δόση άρδευσης καθορίζονταν από κλιματικούς παράγοντες, από φυσιολογικούς παράγοντες και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Όπως έχει αναφερθεί, το ευφυές σύστημα άρδευσης κατέγραφε την μεταβολή της υγρασίας του εδάφους και έδινε εντολή για

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

την αυτόματη έναρξη της άρδευσης κάθε φορά που η εδαφική υγρασία έφτανε το κατώτατο καθορισμένο όριο (24% κ.ο) και τερμάτιζε την άρδευση όταν η εδαφική υγρασία έφτανε την υδατοϊκανότητα (32%κ.ο.). Η εδαφική υγρασία μεταβάλλονταν ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν την περίοδο που μεσολαβούσε μεταξύ των αρδεύσεων αλλά και από τις φυσιολογικές ανάγκες του φυτού όπως αυτές καθορίζονταν από τη φυσιολογική διαφοροποίηση του φυτού στο ίδιο χρονικό διάστημα. Επομένως, η δόση άρδευσης, η διάρκειά της και το εύρος άρδευσης καθορίζονταν ανάλογα με τη μεταβολή της υγρασίας εδάφους και παρουσίαζαν διακύμανση.

Ωστόσο, έπρεπε να γίνει έλεγχος του εύρους άρδευσης για την ελαχιστοποίηση του πιθανού σφάλματος να μεσολαβεί μεγάλος αριθμός ημερών μεταξύ των αρδεύσεων με το ευφυές σύστημα. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης, για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο), την οποία δεν έπρεπε να υπερβαίνει η αθροιστική ημερήσια εξατμισοδιαπνοή μεταξύ δυο διαδοχικών αρδεύσεων. Για τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης απαιτείται να είναι γνωστές οι ακόλουθες παράμετροι:

- Υδατοϊκανότητα του εδάφους (FC),
- Σημείο μόνιμης μάρανσης (PWP),
- Βάθος ριζοστρώματος για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου (RD),
- Συντελεστής εξάντλησης υγρασίας (F),
- Ποσοστό διαβροχής του εδάφους (P)
- Χαρακτηριστικά συστήματος άρδευσης (παροχή q, αριθμός σταλακτήρων ανά φυτό n, βαθμός απόδοσης συστήματος Ed και ισαποχή σταλακτήρων επί του αγωγού εφαρμογής, Se),
- Αποστάσεις σποράς ή φύτευσης (Sr),
- Αποστάσεις των φυτών επί της γραμμής σποράς ή φύτευσης (St) και
- Μέση ημερήσια εξατμισοδιαπνοή για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου από τα δεδομένα προηγούμενων ετών του μετεωρολογικού σταθμού του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής (ETd).

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω παραμέτρους στις σχέσεις 4.11, 4.12, 4.15 και 4.16 και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του Πίνακα 4.2 προκύπτει ο Πίνακας 4.3.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πίνακας 4.2: Τιμές δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης.

	FC (%κ.ο.)	PWP (%κ.ο.)	RD (m)	C	P	f_1	f_2	ETd (mm)
ΙΟΥΝΙΟΣ	32,68	18,50	0,40	0,55	1	1,00	0,75	5,59
ΙΟΥΛΙΟΣ	32,68	18,50	0,50	0,55	1	1,00	0,88	6,16
ΑΥΓ/ΣΤΟΣ	32,68	18,50	0,60	0,55	1	1,00	1,00	5,28
ΣΕΠ/ΡΙΟΣ	32,68	18,50	0,60	0,55	1	1,00	1,00	3,73

Πίνακας 4.3: Θεωρητικός υπολογισμός της δόσης, του εύρους και της διάρκειας άρδευσης.

	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ/ΤΟΣ	ΣΕΠ/ΡΙΟΣ
Διαθέσιμη υγρασία $ASM=\frac{FC-PWP}{100}\times RD$ **(mm ή m³/στρ.)**	56,72	70,90	85,08	85,08
Θεωρητική δόση άρδευσης $Dn=\frac{ASM\times C\times P}{Ed}$ **mm ή m³/στρ.**	32,84	41,05	49,26	49,26
Ωριαίο ύψος βροχής $Dh=\frac{q\times n}{St\times Sr}$ **, mm/h** Όπου $n=\frac{St}{2\times Se}\approx 0{,}08$	1,80	1,80	1,80	1,80
Διάρκεια άρδευσης $t=\frac{Dn}{Dh}$ **, h**	18h 14'	22h 49'	27h 22'	27h 22'
Εύρος άρδευσης $D=\frac{Dn}{ETd}$ **, ημέρες**	≈6	≈6	≈9	≈13

Όπου: St=0,12m,Sr=0,8m, Se=0,8m, q=2,3l/s και Ed=0,95.

4.4.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Άρδευση απαιτείται όταν η βροχόπτωση δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες μιας καλλιέργειας σε νερό (απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής). Πρωταρχικός στόχος των αρδεύσεων είναι να εφαρμόζονται έγκαιρα και η δόση άρδευσης να είναι αυτή που απαιτείται κάθε φορά. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω σχεδιάστηκε το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης για κάθε μεταχείριση (εκτός της αυτόματης Α100). Το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης άρχιζε όταν τα φυτά είχαν μέσο ύψος 0,5m (τέλη Ιουνίου-αρχές Ιουλίου) και ολοκληρώνονταν μέσα Σεπτεμβρίου. Το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης της μεταχείρισης Α100 είχε την ίδια χρονική διάρκεια περίπου με αυτό των υπόλοιπων μεταχειρίσεων. Ωστόσο η ημερομηνία έναρξης και λήξης του διαφοροποιούνταν ανάλογα με τη χρονική στιγμή που ο αισθητήρας καθόριζε την εναρκτήρια και καταληκτική ημερομηνία άρδευσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Κατά την διάρκεια από τη σπορά της καλλιέργειας και μέχρι να ξεκινήσει το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό καλύπτονταν με τη μέθοδο του καταιονισμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κανόνι τεχνητής βροχής, το οποίο είχε παροχή 35,5m^3/h, πίεση λειτουργίας 5,0Atm, διάμετρο διαβροχής 80m και ύψος βροχής 18mm/h. Οι αρδεύσεις άρχιζαν μετά τη σπορά και διαρκούσαν μέχρι τα φυτά να αποκτήσουν μέσο ύψος 0,5m. Ο αριθμός των αρδεύσεων αυτών καθορίζονταν από τις κλιματικές συνθήκες και ιδιαίτερα από τις βροχοπτώσεις που επικρατούσαν την χρονική περίοδο από τη σπορά μέχρι τέλος Ιουνίου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{ο}

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Γ. ΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα περιγράφηκε η επίδραση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των παραγωγικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Υπενθυμίζεται ότι τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας που μελετήθηκαν στην παρούσα έρευνα είναι η μεταβολή του ύψους του κεντρικού στελέχους του φυτού, η μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και η μεταβολή της παραγωγής ξηρής βιομάζας. Το πρόβλημα το οποίο θα προκύψει είναι πολυπαραμετρικό και εντόνως μη γραμμικό. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος το μη γραμμικό μοντέλο γραμμικοποιηθηκε με κατάλληλους μετασχηματισμούς και στη συνέχεια στο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης (Multiple Regression). Στα επόμενα θα αναπτυχθεί η θεωρεία της απλής γραμμικής παλινδρόμησης έτσι ώστε να αποκτηθεί η απαιτούμενη θεωρητική βάση για την ανάλυση, κατανόηση και εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των μοντέλων για κάθε χαρακτηριστικό της καλλιέργειας.

5.2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Σε πολλά προβλήματα, δύο ή περισσότερες μεταβλητές συνδέονται εγγενώς, και είναι απαραίτητο να εξευρεθεί η φύση αυτής της σχέσης. Η ανάλυση με τη μέθοδο της παλινδρόμησης είναι μια τεχνική για μοντελοποίηση και έρευνα μεταξύ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

δύο ή περισσοτέρων μεταβλητών. Η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί ένα μοντέλο πρόβλεψης μιας μεταβλητής (ύψος φυτού, παραγωγή κ.α.). Αυτό το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των τεχνικών καλλιέργειας (Montgomery et al., 1999). Γενικά, η παλινδρόμηση χρησιμοποιείται ικανοποιητικά στις περιπτώσεις που η εξαρτημένη μεταβλητή Y είναι ποσοτική, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου ικανοποιητικά και για ποιοτικές εξαρτημένες μεταβλητές (Montgomery et al., 2003).

Ο Galton, το 1886 χρησιμοποίησε τον όρο ανάλυση παλινδρόμησης σε μια εργασία στην οποία μελέτησε τη σχέση μεταξύ του ύψους των πατεράδων (x) και του ύψους των υιών (y). Ο Galton προσάρμοσε μια γραμμή ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα που συνέλεξε για να προβλέψει το ύψος των υιών από το ύψος των πατεράδων. Ανακάλυψε ότι όταν το ύψος των πατεράδων ήταν πάνω από το μέσο όρο τότε και το ύψος των υιών ήταν πάνω από το μέσο όρο αλλά όχι τόσο πάνω σε σύγκριση με το ύψος των πατεράδων. Αντίστοιχα αποτελέσματα βρέθηκαν και για ύψη που ήταν κάτω από το μέσο όρο. Έτσι το ύψος των υιών «παλινδρομήθηκε» έναντι του μέσου όρου. Επομένως, ο Galton αναφέρθηκε στη γραμμή ελαχίστων τετραγώνων ονομάζοντάς τη γραμμή παλινδρόμησης (Montgomery et al., 2003).

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο Gauss το 1821 στο έργο του "Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoriae" διατύπωσε το θεώρημα των ελαχίστων τετραγώνων και ότι η καλύτερη αμερόληπτη εκτίμηση στο γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο, υλοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Σήμερα το θεώρημα αυτό ονομάζεται θεώρημα των Gauss-Markov, διότι ο Ρώσος Andrei Markov δημοσίευσε στη Ρωσία το 1906 ένα ανάλογο θεώρημα, που έγινε γνωστό στη Δύση από την Μετάφρασή του στα Γερμανικά με τίτλο "Wahrcheinlichkeitsvechnung". Από το 1950 και εντεύθεν το θεώρημα αυτό παγιώνεται ως θεώρημα των Gauss-Markov. Εξ αυτού έπεται ότι ο Galton το 1886 γνώριζε ήδη το θεώρημα του Gauss. Η θεωρεία του Gauss πάνω στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είχε ήδη δημοσιευτεί από τον ίδιο το 1809 χωρίς όμως να περιλάβει και την τροποποίηση της θεωρίας του γνωστή ως θεώρημα των Gauss-Markov. Το 1804 ο Legendre στο έργο του "Nouvelles methods paw la determination des orbites des comètes" περιέγραψε επίσης τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο Galton όπως μνημονεύθηκε παραπάνω απλώς εισήγαγε τον όρο "regression" στην όλη διαδικασία της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η γραφική απεικόνιση των τιμών μιας μεταβλητής (y) σε συνάρτηση με μια δεύτερη μεταβλητή (x) σε δυσδιάστατο σύστημα συντεταγμένων δίνει πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι δύο αυτές μεταβλητές. Το γράφημα ονομάζεται διάγραμμα διασποράς και συνήθως τα σημεία (ζεύγη τιμών) δεν περιγράφονται ακριβώς από κάποιας μορφής καμπύλη. Ωστόσο, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο μέσος όρος της τυχαίας μεταβλητής y σχετίζεται με το x με μια σχέση της μορφής:

$$\mu_{Y|X} = \beta_o + \beta_1 x \qquad (5.1)$$

όπου η κλίση και η απόστασή της από τον άξονα x'x ονομάζονται συντελεστές της παλινδρόμησης. Ο κατάλληλος τρόπος να γενικεύουμε σε ένα πιθανό γραμμικό μοντέλο είναι να θεωρήσουμε ότι η αναμενόμενη τιμή y είναι μια γραμμική εξίσωση του x, αλλά για μια δεδομένη τιμή του x η πραγματική τιμή y καθορίζεται από τις μέσες τιμές της εξίσωσης του γραμμικού μοντέλου προσθέτοντας ένα τυχαίο όρο σφάλματος (ε). Τότε η εξίσωση 5.1 παίρνει την μορφή:

$$y = \beta_o + \beta_1 x + \varepsilon \qquad (5.2)$$

Μπορούμε να ονομάσουμε αυτό το μοντέλο απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης επειδή έχει μια μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή ή παλινδρόμο. Πολλές φορές ένα μοντέλο όπως το παραπάνω μπορεί να προκύψει από μια θεωρητική σχέση, συνήθως, όμως, απαιτείται έρευνα. Όταν η τιμή του x είναι προκαθορισμένη, ο τυχαίος παράγοντας ε στο δεξιό μέρος της 5.2 καθορίζει τις ιδιότητες του y. Αν υποθέσουμε ότι ο μέσος όρος και η διακύμανση του ε είναι 0 και σ^2 αντίστοιχα, τότε:

$$E(Y \mid X) = E(\beta_o + \beta_1 x + \varepsilon) = \beta_o + \beta_1 x + \mathrm{E}(\varepsilon) = \beta_o + \beta_1 x \qquad (5.3)$$

Παρατηρούμε ότι η σχέση 5.3 είναι ίδια με την εμπειρική σχέση 5.1 η οποία προέκυψε από τη μελέτη του διαγράμματος διασποράς. Η μεταβλητότητα (ή διασπορά, variance) του y δοθέντος του x δίνεται από τη σχέση:

$$Var(Y \mid X) = Var(\beta_o + \beta_1 x + \varepsilon) = Var(\beta_o + \beta_1 x) + Var(\varepsilon) = 0 + \sigma^2 = \sigma^2$$

Η μεταβλητότητα σ^2 καθορίζει την διακύμανση των παρατηρούμενων τιμών y. Έτσι, όταν το σ^2 είναι μικρό οι παρατηρούμενες τιμές του y βρίσκονται κοντά στη γραμμή, ενώ όταν το σ^2 είναι μεγάλο οι παρατηρούμενες τιμές του y απέχουν σημαντικά από τη γραμμή. Επειδή το σ^2 είναι σταθερό η διακύμανση του y για κάθε τιμή του x είναι η ίδια. Επομένως, το πραγματικό μοντέλο παλινδρόμησης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$\mu_{Y|X} = \beta_o + \beta_1 x$ είναι μια γραμμή μέσων τιμών, όπου το ύψος της γραμμής παλινδρόμησης για κάθε τιμή x είναι ακριβώς η αναμενόμενη τιμή του y για το συγκεκριμένο x. (Montgomery et al., 1999).

Στα περισσότερα πραγματικά προβλήματα οι τιμές της διαφοράς ύψους (β_o), η κλίση (β_1) και η μεταβλητότητα ή διασπορά (σ^2) δεν είναι γνωστά αλλά απαιτείται να υπολογιστούν από δείγματα δεδομένων. Η ανάλυση παλινδρόμησης είναι μια συλλογή από στατιστικά εργαλεία για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου παλινδρόμησης. Επομένως, αυτή η καθορισμένη εξίσωση παλινδρόμησης ή μοντέλο παλινδρόμησης χρησιμοποιείται τυπικά για την πρόβλεψη μελλοντικών παρατηρήσεων του y ή για την εκτίμηση της μέσης απόκρισης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο x (Montgomery et al., 2003).

5.2.1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ

Συχνά ανακαλύπτουμε ότι ένα μοντέλο παλινδρόμησης που περιγράφεται από ευθεία γραμμή της μορφής 5.2 είναι ακατάλληλο επειδή η πραγματική εξίσωση παλινδρόμησης είναι μη γραμμική. Μερικές φορές η μη γραμμικότητα φαίνεται οπτικώς από το διάγραμμα διασποράς ενώ σε άλλες περιπτώσεις λόγω προηγούμενης εμπειρίας ή υπογραμμισμένης θεωρίας είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι το μοντέλο είναι μη γραμμικό. Στις περιπτώσεις αυτές μια μη γραμμική εξίσωση μπορεί να εκφραστεί με μια ευθεία γραμμή χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο μετασχηματισμό. Τέτοια μη γραμμικά μοντέλα ονομάζονται εσωτερικά γραμμικά (Montgomery et al., 1999).

Παραδείγματα μη γραμμικών μοντέλων τα οποία είναι εσωτερικά γραμμικά θεωρούνται τα μοντέλα που περιγράφονται από εκθετικές εξισώσεις. Αυτού του τύπου τα μοντέλα είναι εσωτερικά γραμμικά αφού μπορούν να εκφραστούν από γραμμική εξίσωση με λογαριθμικό μετασχηματισμό. Σε πολλές πολύπλοκες περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν πολλές διαφορετικές τεχνικές μετασχηματισμού για να γραμμικοποιηθεί μια εξίσωση. Στην παρούσα έρευνα εφαρμόστηκε ο λογαριθμικός μετασχηματισμός και χρησιμοποιήθηκε ο δεκαδικός λογάριθμος (Montgomery et al., 1999).

5.3. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Η περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης περιλαμβάνει ένα απλό παλινδρομητή ή εκτιμητή x και μια εξαρτημένη μεταβλητή y. Υποθέτουμε ότι η

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σχέση που συνδέει την μεταβλητή y με την ανεξάρτητη μεταβλητή x είναι γραμμική και έχει τη μορφή: $y = \beta_o + \beta_1 x + \varepsilon$, όπου το ε είναι το τυχαίο σφάλμα με μέσο όρο 0 και μεταβλητότητα σ^2. Τα τυχαία σφάλματα αντιστοιχούν σε διαφορετικές παρατηρήσεις και επίσης γίνεται η παραδοχή ότι είναι μη συσχετιζόμενες τυχαίες μεταβλητές (Montgomery et al., 1999).

Γίνεται η παραδοχή ότι συλλέγονται n ζεύγη τιμών (x_i ,y_i), όπου i=1,2,…n κατά τη διάρκεια μιας έρευνας. Αυτά τα ζεύγη τιμών μπορούν να παρασταθούν γραφικά και να δώσουν το διάγραμμα διασποράς. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται μια πρώτη εκτίμηση για το αν υπάρχει κάποιας μορφής εξίσωση που να ικανοποιεί τα δεδομένα. Στόχος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι να γίνει εκτίμηση των συντελεστών β_o και β_1 κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ευθεία γραμμή που να ικανοποιεί καλύτερα τα δεδομένα. Ο Γερμανός επιστήμονας Karl Gauss (1809) πρότεινε οι συντελεστές β_o και β_1 να υπολογίζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των τετραγώνων των κάθετων αποστάσεων του κάθε ζεύγους τιμών (x_i ,y_i) από την εκτιμώμενη ευθεία γραμμή. Το κριτήριο αυτό υπολογισμού των συντελεστών παλινδρόμησης ονομάζεται μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Οι n παρατηρήσεις στο δείγμα εκφράζονται από τη σχέση:

$$y_i = \beta_o + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i=1,2,\ldots n \tag{5.4}$$

Ενώ το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων των παρατηρήσεων από την πραγματική εξίσωση παλινδρόμησης δίνεται από την σχέση:

$$L = \sum_{i-1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \beta_o - \beta_1 x_i)^2 \tag{5.5}$$

Για την ελαχιστοποίηση της σχέσης (5.5), παίρνουμε τις πρώτες παραγώγους ως προς τις παραμέτρους β_0 και β_1, και τις εξισώνουμε προς το μηδέν.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_o}\Big|_{\hat{\beta}_o,\hat{\beta}_1} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{\beta}_o - \hat{\beta}_1 x_i) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_1}\Big|_{\hat{\beta}_o,\hat{\beta}_1} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{\beta}_o - \hat{\beta}_1 x_i)x_i = 0 \tag{5.6}$$

Οι $\hat{\beta}_0$ και $\hat{\beta}_1$ αποτελούν τις εκτιμήτριες των β_0 και β_1.

Απλοποιώντας τις εξισώσεις (5.6) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$\left.\begin{aligned} n\hat{\beta}_o + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^{n} x_i &= \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^{n} x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 &= \sum_{i=1}^{n} y_i x_i \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} y_i x_i \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Οι εξισώσεις 5.7 καλούνται κανονικές εξισώσεις (normal equations) και η επίλυση του συστήματος αυτών δίνει την εκτίμηση των β_0 και β_1. Από την σχέση (5.7) προκύπτει:

$$\hat{\beta}_o = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (5.8)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (5.9)$$

Όπου $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$, $S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$, $S_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$.

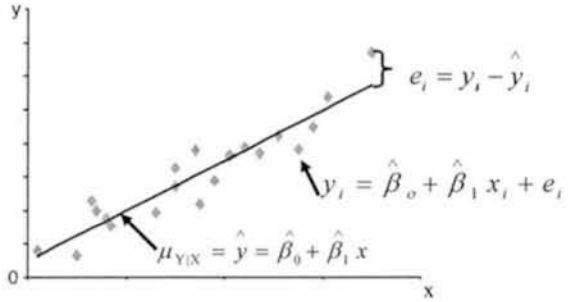
Σύμφωνα με τα παραπάνω η εκτιμώμενη γραμμή παλινδρόμησης είναι:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (5.10)$$

και κάθε ζευγάρι τιμών ικανοποιεί τη σχέση:

$$y_i = \hat{\beta}_o + \hat{\beta}_1 x_i + e_i, \text{ i=1,2,....n}$$

όπου $e_i = y_i - \hat{y}_i$ και καλείται υπόλοιπο. Το υπόλοιπο περιγράφει το σφάλμα στον προσδιορισμό του μοντέλου για την i παρατήρηση του y, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 (Montgomery et al., 1999).



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση των μετρημένων τιμών, των εκτιμηθέντων τιμών και των τιμών του σφάλματος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

5.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΤΡΙΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ σ^2

Οι στατιστικές ιδιότητες των εκτιμητριών ελαχίστων τετραγώνων $\hat{\beta}_o$ και $\hat{\beta}_1$ είναι εύκολο να περιγραφούν. Υπενθυμίζεται ότι έχει γίνει η παραδοχή πως ο όρος του σφάλματος ε στο μοντέλο $y = \beta_o + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με μέσο όρο 0 και μεταβλητότητα σ^2. Αφού οι τιμές του x είναι καθορισμένες η y μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια τυχαία μεταβλητή με μέσο όρο $\mu_{Y|X} = \beta_o + \beta_1 x$ και μεταβλητότητα σ^2. Έτσι οι τιμές των β_0 και β_1 εξαρτώνται από τις παρατηρούμενες τιμές y και επομένως οι εκτιμήτριες των ελαχίστων τετραγώνων των συντελεστών παλινδρόμησης μπορούν να θεωρηθούν επίσης τυχαίες μεταβλητές (Montgomery et al., 1999).

Για την ανάλυση των ιδιοτήτων του $\hat{\beta}_1$ μπορεί να ειπωθεί ότι επειδή το $\hat{\beta}_1$ είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των παρατηρήσεων y, η αναμενόμενη τιμή του προκύπτει ως εξής:

Από τη σχέση (5.9)προκύπτει:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \sum_{i=1}^{n} C_i y_i \quad \text{όπου} \quad C_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

Άρα:

$$E\left(\hat{\beta}_1\right) = E\left(\sum_{i=1}^{n} C_i y_i\right) = \sum_{i=1}^{n} C_i E(y_i) = \sum_{i=1}^{n} C_i (\beta_0 + \beta_1 x_i) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n} C_i + \beta_1 \sum_{i=1}^{n} C_i x_i$$

Αλλά $\sum_{i=1}^{n} C_i = 0$ και η άνω σχέση γίνεται:

$$E\left(\hat{\beta}_1\right) = 0 + \beta_1 \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) x_i}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \beta_1 \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) x_i - x_i \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \beta_1 \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \beta_1$$

Στην παραπάνω σχέση προστέθηκε ο όρος $-x_i \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) = 0$

Έτσι προκύπτει ότι:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$E\left(\hat{\beta}_1\right) = \beta_1 \tag{5.11}$$

και η εκτιμήτρια $\hat{\beta}_1$ είναι ένας αμερόληπτη εκτιμήτρια της β_1.

Επίσης η $\hat{\beta}_o$ είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της β_0. Πράγματι από την 5.8 έχουμε:

$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}$ και

$$E\left(\hat{\beta}_0\right) = E\left(\bar{y}_i - \hat{\beta}_1 \bar{x}\right) = E(\bar{y}) - \bar{x}E\left(\hat{\beta}_1\right) = E\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}\right) - \bar{x}\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - \bar{x}\beta_1 =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\beta_0 + \beta_1 x_i\right)}{n} - \bar{x}\beta_1 = \beta_0 \frac{n}{n} + \beta_1\bar{x} - \beta_1\bar{x} = \beta_0$$

Έτσι προκύπτει ότι:

$$E\left(\hat{\beta}_0\right) = \beta_0 \tag{5.12}$$

Για την μεταβλητότητα της $\hat{\beta}_1$ εργαζόμαστε ως εξής:

Έχουμε τη σχέση

$\hat{\beta}_1 = \sum_{i=1}^{n} C_i y_i$ οπότε

$$Var\left(\hat{\beta}_1\right) = \sum_{i=1}^{n} C_i^2\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} = \frac{\sigma^2}{S_{xx}} \tag{5.13}$$

Για την μεταβλητότητα του $\hat{\beta}_o$ θα έχουμε πάλι:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - \bar{x}\sum_{i=1}^{n} C_i y_i = \sum\left(\frac{1}{n} - C_i\bar{x}\right)y_i = \sum_{i=1}^{n} d_i y_i\,, \quad \text{όπου} \quad d_i = \frac{1}{n} - C_i\bar{x}$$

Άρα:

$$Var\left(\hat{\beta}_0\right) = \sum_{i=1}^{n} d_i^2\sigma^2 = \sigma^2\sum_{i=1}^{n} d_i^2 = \sigma^2\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n} - C_i\bar{x}\right)^2 = \sigma^2\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{2C_i\bar{x}}{n} + C_i^2\bar{x}^2\right) =$$

$$= \sigma^2\left[\frac{1}{n} - 0 + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\right] = \sigma^2\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και επομένως: $Var\left(\hat{\beta}_0\right) = \sigma^2\left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right]$ (5.14)

Έτσι η $\hat{\beta}_o$ είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της αληθινής παραμέτρου β_o. Η συμμεταβλητότητα των τυχαίων μεταβλητών $\hat{\beta}_o$ και $\hat{\beta}_1$ δεν είναι 0 και μπορεί να δειχθεί ότι:

$$\text{cov}(\hat{\beta}_o, \hat{\beta}_1) = -\frac{\sigma^2 \bar{x}}{S_{xx}} \quad (5.15)$$

Για να προκύψουν συμπεράσματα για τους συντελεστές παλινδρόμησης β_o και β_1 απαιτείται να υπολογιστεί η μεταβλητότητα σ^2 που εμφανίζεται στις σχέσεις 5.13 και 5.14. Η παράμετρος σ^2 η οποία αποτελεί την μεταβλητότητα του σφάλματος ε στο μοντέλο της παλινδρόμησης, αντικατοπτρίζει την τυχαία διακύμανση γύρω από την πραγματική γραμμή παλινδρόμησης. Τα υπόλοιπα $e_i = y_i - \hat{y}_i$ χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εκτίμησης του σ^2. Το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων ή το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος είναι:

$$SS_E = \sum_{i=1}^{n} e_i^{\,2} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.16)$$

Μπορεί να δειχθεί ότι η αναμενόμενη τιμή για το άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος SS_E είναι:

$E(SS_E)=(n-2)\sigma^2$ (5.17)

Έτσι: $\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n-2} = \frac{\sum\left(y_i - \hat{y}\right)^2}{n-2}$ (5.18)

και το $\hat{\sigma}^2$ είναι μια αμερόληπτη εκτιμήτρια του σ^2.

Ωστόσο πιο εύχρηστες αποδεικνύονται οι εξισώσεις:

$$SS_E = \sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \left(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i\right)\right]^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \bar{y} + \hat{\beta}_1 \bar{x} - \hat{\beta}_1 x_i\right]^2 =$$

$$= \sum_{i=1}^{n}\left[(y_i - \bar{y}) - \hat{\beta}_1(x_i - \bar{x})\right]^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[(y_i - \bar{y})^2 - \hat{\beta}_1(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\right] = \sum(y_i - \bar{y})^2 - \hat{\beta}_1 S_{xy}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και αν θέσουμε με $S_{yy} = n\sum_{i=1} y_i^{\,2} - n\bar{y}^{\,2} = \sum (y_i - \bar{y})^2$ τότε μπορούμε να γράψουμε

$$SS_E = S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy} \qquad (5.19)$$

Η εκτίμηση του σ^2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση 5.13 για να προκύψει μια εκτίμηση της μεταβλητότητας της κλίσης β_1 και στην εξίσωση 5.14 για την εκτίμηση της μεταβλητότητας της απόστασης β_0 από τον άξονα x'x. Οι τετραγωνικές ρίζες των εκτιμητριών της μεταβλητότητας που προκύπτουν ονομάζονται εκτιμώμενα σταθερά σφάλματα της κλίσης β_1 και της διαφοράς ύψους β_0 αντίστοιχα. Στην απλή γραμμική παλινδρόμηση το εκτιμώμενο σταθερό σφάλμα της κλίσης β_1 και της διαφοράς ύψους β_0 αντίστοιχα, είναι:

$$S_e(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{S_{xx}}}$$

$$S_e(\hat{\beta}_o) = \sqrt{\hat{\sigma}^2\left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right]} = \hat{\sigma}\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}}{S_{xx}}}$$

Όπου $\hat{\sigma}$ υπολογίζεται από την σχέση 5.18 (Montgomery et al., 1999).

5.5. ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Ένα σημαντικό κομμάτι στην προσπάθεια να γίνει εξακρίβωση της ακρίβειας ενός μοντέλου παλινδρόμησης αποτελεί ο έλεγχος των στατιστικών υποθέσεων σχετικά με τις παραμέτρους του μοντέλου και τον καθορισμό συγκεκριμένων ορίων εμπιστοσύνης. Στον έλεγχο της υπόθεσης για τον καθορισμό της κλίσης και απόστασης από τον άξονα X'X της ευθείας ενός μοντέλου παλινδρόμησης λαμβάνεται υπόψη η επιπλέον παραδοχή ότι το σφάλμα ε του μοντέλου ακολουθεί κανονική κατανομή. Έτσι, το σφάλμα ε ακολουθεί κανονική και ανεξάρτητη κατανομή με μέσο όρο **0** και μεταβλητότητα $\boldsymbol{\sigma^2}$ [NID(0, σ^2)] (Montgomery et al., 1999).

5.5.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ T-ΤΕΣΤ

Υποτίθεται ότι απαιτείται να γίνει έλεγχος της υπόθεσης «η κλίση της ευθείας που προκύπτει από την εφαρμογή ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι ίση με μια σταθερά $\beta_{1,0}$». Η κατάλληλη έκφραση της παραπάνω υπόθεσης είναι:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

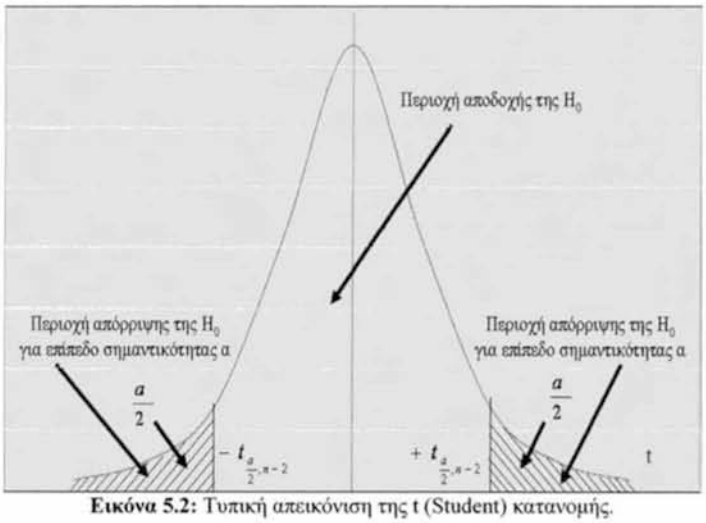
H_0: $\beta_1 = \beta_{1,0}$ (Μηδενική υπόθεση)

H_1: $\beta_1 \neq \beta_{1,0}$ (Εναλλακτική) (5.20)

Η $\hat{\beta}_1$ αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των y_i κανονικών μεταβλητών, άρα αποτελεί κανονική κατανομή και η τυποποιημένη μεταβλητή $X = \frac{\hat{\beta}_1 - E\left(\hat{\beta}_1\right)}{\sigma_{\hat{\beta}_1}} = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{\sigma_{\hat{\beta}_1}} = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}}}$ είναι τυποποιημένη κανονική μεταβλητή.

Η ποσότητα όμως $\frac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί μια X^2 κατανομή με n-2 βαθμούς ελευθερίας.

Επομένως, η ποσότητα: $t = \frac{\frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}}}}{\sqrt{\frac{\frac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}}{n-2}}} = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_1}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{S_{xx}}}}$ ακολουθεί μια t (Student) κατανομή με n-2 βαθμούς ελευθερίας. Μια τυπική απεικόνιση της t (Student) κατανομής φαίνεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Τυπική απεικόνιση της t (Student) κατανομής.

Επομένως το στατιστικό κριτήριο T_0 ακολουθεί t (Student) κατανομή με n-2 βαθμούς ελευθερίας για την υπόθεση H_0: $\beta_1 = \beta_{1,0}$ και υπολογίζεται από τη σχέση:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$T_o = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_{1,0}}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}} = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_{1,0}}{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sqrt{S_{xx}}}} \qquad (5.21)$$

Η υπόθεση H_0: $\beta_1 = \beta_{1,0}$ απορρίπτεται όταν $|t_0| \succ t_{\frac{\alpha}{2},n-2}$, σε επίπεδο σημαντικότητας α. Στην εξίσωση 5.21 ο παρονομαστής αποτελεί το τυπικό σφάλμα της κλίσης και έτσι αυτή μπορεί να γραφεί:

$T_o = \frac{\hat{\beta}_1 - \beta_{1,0}}{Se(\hat{\beta}_1)}$ (Montgomery et al., 1999).

Αντίστοιχα για την απόσταση της ευθείας από τον άξονα των x η υπόθεση θα είναι: «η απόσταση της ευθείας που προκύπτει από την εφαρμογή ενός μοντέλου παλινδρόμησης από τον άξονα των χείναι ίση με μια σταθερά $\beta_{0,0}$». Η κατάλληλη έκφραση της παραπάνω υπόθεσης είναι:

H_0: $\beta_0 = \beta_{0,0}$ (Μηδενική υπόθεση)

H_1: $\beta_0 \neq \beta_{0,0}$ (Εναλλακτική) (5.22)

Το στατιστικό T_0 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_o = \frac{\hat{\beta}_0 - \beta_{0,0}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right)}} = \frac{\hat{\beta}_o - \beta_{0,0}}{Se(\hat{\beta}_o)} \qquad (5.23)$$

και η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται όταν $|t_0| \succ t_{\frac{\alpha}{2},n-2}$. Στην εξίσωση 5.23 ο παρονομαστής αποτελεί το τυπικό σφάλμα της απόστασης β_0 (Montgomery et al., 1999).

Μια ιδιαίτερη περίπτωση είναι η σταθερά $\beta_{1,0}=0$ οπότε η 5.20 γίνεται:

H_0: $\beta_1 = 0$

H_1: $\beta_1 \neq 0$ (5.24)

Η υπόθεση αυτή αποτελεί τη σημαντικότητα της παλινδρόμησης. Όταν δεν είναι δυνατή η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης (H_0: $\beta_1=0$) τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των x και y ή ότι τα συγκεκριμένα x δεν εξηγούν ικανοποιητικά την μεταβλητότητα των y. Αντίθετα όταν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση (H_0: $\beta_1=0$) τότε εξάγεται το συμπέρασμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ότι τα x εξηγούν ικανοποιητικά την μεταβλητότητα των y. Απόρριψη της H_0: $\beta_1=0$ μπορεί επίσης να σημαίνει είτε ότι υπάρχει ευθεία που περιγράφει ικανοποιητικά το μοντέλο, είτε ότι καλύτερη περιγραφή του μοντέλου θα μπορούσε να γίνει από την εφαρμογή μεγαλύτερης τάξης πολυωνύμου (Montgomery et al., 1999).

5.5.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ (ANOVA)

Η ανάλυση της μεταβλητότητας είναι μια άλλη μέθοδος καθορισμού της σημαντικότητας της παλινδρόμησης. Η διαδικασία βασίζεται στον καθορισμό εκείνης της παραμέτρου που είναι η σημαντικότερη για την περιγραφή του μοντέλου. Γενικά η ανάλυση παραλλακτικότητας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2=\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_i-\bar{y}\right)^2+\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2 \qquad (5.25)$$

Από τις δύο ποσότητες στο δεξιό μέρος της 5.25, η πρώτη, περιγράφει ποσοτικά την μεταβλητότητα των y_i η οποία εξηγείται από την ευθεία της παλινδρόμησης ενώ η δεύτερη περιγράφει ποσοτικά την μεταβλητότητα των υπολοίπων που δεν εξηγείται από την γραμμή της παλινδρόμησης. Συνήθως με $SS_E=\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2$ περιγράφεται **το σφάλμα του αθροίσματος τετραγώνων των υπολοίπων,** το οποίο έχει n-2 βαθμούς ελευθερίας, και με $SS_R=\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_i-\bar{y}\right)^2$ **το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης,** το οποίο έχει 1 βαθμό ελευθερίας (Montgomery et al., 1999).

Συντομογραφικά η 5.25 γράφεται από τη σχέση:

$$S_{yy}=SS_R+SS_E$$

(Ολική μεταβολή=Παλινδρομική μεταβολή+Υπόλοιπη μεταβολή) (5.26)

όπου η ποσότητα $S_{yy}=\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2$ αποτελεί **το συνολικό άθροισμα τετραγώνων των y,** το οποίο έχει n-1 βαθμούς ελευθερίας. Στην παράγραφο 5.4 βρέθηκε ότι: $SS_E=S_{yy}-\hat{\beta}_1 S_{xy}$. Λύνοντας ως προς S_{yy} την προηγούμενη εξίσωση και λαμβάνοντας υπόψη την 5.27 προκύπτει τελικά ότι: $SS_R=\hat{\beta}_1 S_{xy}$.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Μπορεί να αποδειχθεί ότι: $E\left(\frac{SS_E}{n-2}\right)=\sigma^2$, $E(SS_R)=\sigma^2+\beta_1^2 S_{xx}$. Επίσης μπορεί να δειχθεί ότι: $\frac{SS_E}{\sigma^2}$ και $\frac{SS_R}{\sigma^2}$ είναι ανεξάρτητες χ^2 τυχαίες μεταβλητές με n-2 και 1 βαθμό ελευθερίας, αντίστοιχα. Επομένως, όταν η μηδενική υπόθεση (H_0: β_1= 0) γίνεται αποδεκτή τότε το στατιστικό F_0 ακολουθεί F κατανομή με 1 και n-2 βαθμούς ελευθερίας και υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_o=\frac{\frac{X_1^2}{v_1}}{\frac{X_2^2}{v_2}}=\frac{\frac{SS_R}{1}}{\frac{SS_E}{n-2}}=\frac{MS_R}{MS_E}\text{, όπου } (v_1=1 \text{ και } v_2=n-2) \tag{5.27}$$

Η υπόθεση H_0: β_1= 0 απορρίπτεται όταν: $|f_0| \succ f_{\alpha,1,n-2}$. Ο αριθμητής και ο παρονομαστής της εξίσωσης 5.27 ονομάζονται μέσα τετράγωνα (Montgomery et al., 1999).

Αναφέρθηκε, στην αρχή της παραγράφου, ότι η ανάλυση της μεταβλητότητας είναι μια άλλη μέθοδος καθορισμού της σημαντικότητας της παλινδρόμησης εναλλακτική του t-test, η οποία δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το t-test. Εάν στην εξίσωση 5.21 το $\beta_{1,0}$=0 τότε προκύπτει:

$$T_o=\frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}}=\frac{\hat{\beta}_1}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{S_{xx}}}} \tag{5.28}$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο την παραπάνω σχέση και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\hat{\sigma}^2=MS_E$ προκύπτει:

$$T_o^2=\left(\frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{SS_{xx}}}}\right)^2=\frac{MS_R}{ME_E} \tag{5.29}$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 5.27 και 5.29 γίνεται φανερό ότι το F_0 είναι το ίδιο με το T_0. Γενικά, το τετράγωνο μιας t τυχαίας μεταβλητής με ν βαθμούς ελευθερίας αποτελεί ταυτόχρονα και μια F τυχαία μεταβλητή με 1 και ν βαθμούς ελευθερίας στον αριθμητή και τον παρονομαστή, αντίστοιχα. Επομένως, οι δυο μέθοδοι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

προσδιορισμού της σημαντικότητας της παλινδρόμησης είναι ισοδύναμοι με το t-test να χρησιμοποιείται περισσότερο στη μελέτη μονόπλευρων εναλλακτικών υποθέσεων και το F-test στη μελέτη αμφίπλευρων εναλλακτικών υποθέσεων. (Φωτιάδης, 1994, Montgomery et al., 1999).

5.6. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ

5.6.1. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ β_1 ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ β_0

Οι Montgomery et al. (1999) αναφέρουν ότι εκτός από την εκτίμηση των τιμών της κλίσης (β_1) και της απόστασης από τον άξονα των x (β_0), είναι δυνατό να προσδιοριστούν και τα όρια εμπιστοσύνης μεταξύ των οποίων πρέπει να κυμαίνονται οι παραπάνω τιμές. Το εύρος των ορίων εμπιστοσύνης αποτελεί μια ένδειξη για την συνολική ποιότητα της ευθείας που προκύπτει από την παλινδρόμηση. Εάν οι όροι του σφάλματος ε_i στο μοντέλο της παλινδρόμησης είναι κανονικά και ανεξάρτητα κατανεμημένοι, τότε οι ποσότητες $\dfrac{\left(\hat{\beta}_1-\beta_1\right)}{\sqrt{\dfrac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}}$ και $\dfrac{\left(\hat{\beta}_0-\beta_0\right)}{\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(\dfrac{1}{n}+\dfrac{\bar{x}^2}{SS_{xx}}\right)}}$ αποτελούν τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες ακολουθούν t (student) κατανομή με n-2 βαθμούς ελευθερίας. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, για παρατηρήσεις που ακολουθούν κανονική και ανεξάρτητη κατανομή, τα όρια εμπιστοσύνης της κλίσης β_1 στην απλή γραμμική παλινδρόμηση για πιθανότητα 100(1-α) % δίνονται από την σχέση:

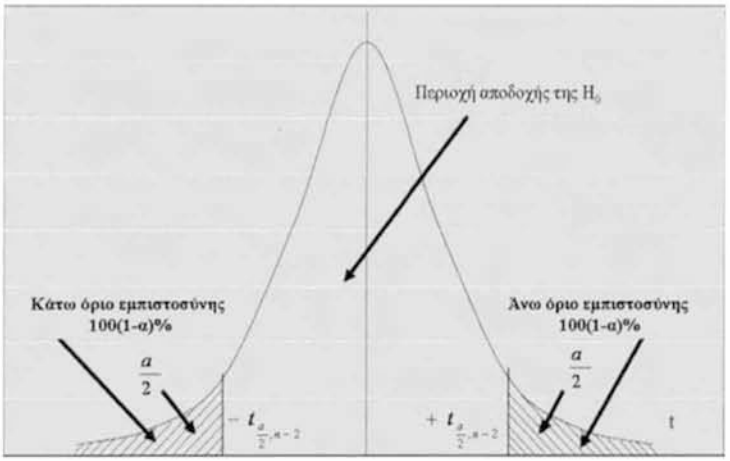
$$\hat{\beta}_1-t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}\le\beta_1\le\hat{\beta}_1+t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}} \qquad (5.30)$$

και της απόστασης από τον άξονα των x, από την σχέση, αντίστοιχα:

$$\hat{\beta}_0-t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(\frac{1}{n}+\frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right)}\le\beta_0\le\hat{\beta}_0+t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(\frac{1}{n}+\frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right)} \qquad (5.31)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζονται τα όρια εμπιστοσύνης μιας κανονικής t (Student) κατανομής.



Εικόνα 5.3: Όρια εμπιστοσύνης μιας τυπικής κανονικής t (Student) κατανομής.

5.6.2. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Όρια εμπιστοσύνης είναι δυνατό να καθοριστούν για τη μέση απόκριση της εξαρτημένης μεταβλητής για μια συγκεκριμένη τιμή των x, έστω x_0. Αυτό το όριο εμπιστοσύνης καλείται όριο εμπιστοσύνης γύρω από την γραμμή της παλινδρόμησης. Όπως ήδη αναφέρθηκε $\mu_{Y|X} = \beta_0 + \beta_1 x_0$, έτσι είναι δυνατό να υπολογιστεί μια εκτίμηση της μέσης τιμής του y στο σημείο $x = x_0 \left(\mu_{Y|x_0}\right)$ από το μοντέλο που έχει προκύψει εφαρμόζοντας τη σχέση:

$$\hat{\mu}_{Y|X} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0$$

Η τιμή $\hat{\mu}_{Y|x_0}$ αποτελεί εκτιμήτρια της $\mu_{Y|x_0}$ και γράφεται ως εξής:

$$\mu_{Y|x_0|} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0 = \sum_{i=1}^{n} d_i y_i + \left(\sum_{i=1}^{n} C_i y_i\right) x_0 = \sum_{i=1}^{n} \left(d_i + C_i x_0\right) y_i$$

Η μεταβλητή λοιπόν $\mu_{Y|x_0}$ είναι γραμμικός συνδυασμός των y_i, δηλαδή μεταβλητών που ακολουθούν κανονική κατανομή, με προσδοκιτή τιμή:

$$E\left(\hat{\mu}_{Y|x_0}\right) = E\left(\beta_0 + \beta_1 x_0\right) = \beta_0 + \beta_1 x_0$$

και μεταβλητότητα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$\sigma_{\mu}^2 = \sigma^2 \sum_{i=1}^{n} (d_i + C_i x_0)^2 = \sigma^2 \sum_{i=1}^{n} \left[d_i^2 + (C_i x_0)^2 + 2 d_i C_i x_0 \right] =$$

$$= \sigma^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}}{S_{xx}} - \frac{2 x_0 \bar{x}}{S_{xx}} + \frac{x_0^2}{S_{xx}} \right) = \sigma^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]$$

Η μεταβλητή λοιπόν $\dfrac{\hat{\mu}_{Y|x_0} - E\left(\hat{\mu}_{Y|x_0}\right)}{\sigma_{\mu}}$ αποτελεί μια τυποποιημένη τυχαία κανονική μεταβλητή, ενώ η μεταβλητή $\dfrac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί κατανομή X^2 με n-2 βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, ο λόγος της πρώτης μεταβλητής προς την τετραγωνική ρίζα της δεύτερης διαιρούμενης με n-2 βαθμούς ελευθερίας, αποτελεί μια t (Student) κατανομή.

Όπου $t = \dfrac{\dfrac{\hat{\mu}_{Y|x_0} - E\left(\hat{\mu}_{Y|x_0}\right)}{\sigma_{\mu}}}{\sqrt{\dfrac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{(n-2)\sigma^2}}} = \dfrac{\hat{\mu}_{Y|x_0} - E\left(\hat{\mu}_{Y|x_0}\right)}{\hat{\sigma}\sqrt{\dfrac{1}{n} + \dfrac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}}}$

Επομένως για συντελεστή εμπιστοσύνης 100(1-α)%, τα όρια εμπιστοσύνης της $\mu_{Y|x_0}$ δίνονται από τη σχέση:

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} - t_{\frac{\alpha}{2},n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right)} \le \mu_{Y|x_0} \le \hat{\mu}_{Y|x_0} + t_{\frac{\alpha}{2},n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right)} \qquad 5.32)$$

όπου $\hat{\mu}_{Y|X} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0$ υπολογίζεται από το μοντέλο που έχει προκύψει από την εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Επισημαίνεται ότι το εύρος του ορίου εμπιστοσύνης του $\hat{\mu}_{Y|x_0}$ είναι εξίσωση της καθορισμένης τιμής x_0 και ελαχιστοποιείται όταν $x_0 = \bar{x}$ ενώ διευρύνεται όσο η ποσότητα $|x_0 - \bar{x}|$ αυξάνει (Montgomery et al., 2003).

5.7. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΝΕΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Μια σημαντική εφαρμογή του μοντέλου που προκύπτει από την εφαρμογή της παλινδρόμησης είναι η πρόβλεψη ή ο υπολογισμός μιας μελλοντικής τιμής του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

y, η οποία αναφέρεται σε συγκεκριμένο επίπεδο του παλινδρόμου (προβλέπτη) x. Εάν x_0 είναι μια τιμή ενδιαφέροντος για την οποία επιθυμείται να προβλεφθεί μια τιμή του y, τότε από την σχέση $\hat{y}_0 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0$ (5.33) υπολογίζεται μια εκτίμηση του y για το συγκεκριμένο x_0. Αυτή η νέα παρατήρηση είναι ανεξάρτητη από τις τιμές που δίνει το μοντέλο που προέκυψε από την παλινδρόμηση και επομένως η σχέση 5.32 δεν περιγράφει ικανοποιητικά τα όρια εμπιστοσύνης της πρόβλεψης y_0. Η σχέση 5.32 δίνει τα όρια εμπιστοσύνης της μέσης απόκρισης $\hat{\mu}_{y|x_0}$ η οποία αποτελεί το μέσο όρο πραγματικών μετρήσεων που συλλέχθηκαν, βάση των οποίων προέκυψε το μοντέλο της παλινδρόμησης, και όχι τα όρια εμπιστοσύνης μελλοντικών παρατηρήσεων.

Εάν υποτεθεί ότι y_0 είναι μια μελλοντική παρατήρηση για $x=x_0$ και η εκτίμηση του y_0 δίνεται από τη σχέση 5.33 τότε το σφάλμα πρόβλεψης δίνεται από τη σχέση: $e_p = y_0 - \hat{y}_0$. Το σφάλμα είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο όρο **0** και μεταβλητότητα:

$$Var(e_p) = Var\left(y_0 - \hat{y}_0\right) = \sigma^2\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x_0 - \bar{x}\right)^2}{S_{xx}}\right]$$

αφού η y_0 είναι ανεξάρτητη της $\hat{y}_0$. Εάν χρησιμοποιηθεί το $\hat{\sigma}^2$ για να προσδιοριστεί η μεταβλητότητα σ^2 τότε η ποσότητα:

$\frac{y_0 - \hat{y}_0}{\sqrt{\hat{\sigma}^2\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x_0 - \bar{x}\right)^2}{S_{xx}}\right]}}$ ακολουθεί κατανομή t (Student) με n-2 βαθμούς ελευθερίας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για πιθανότητα 100(1-α)% τα όρια εμπιστοσύνης για μια μελλοντική παρατήρηση y_0 για την καθορισμένη τιμή x_0 δίνονται από τη σχέση:

$$\hat{y}_0 - t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x_0 - \bar{x}\right)^2}{S_{xx}}\right)} \le y_0 \le \hat{y}_0 + t_{\frac{\alpha}{2},n-2}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x_0 - x\right)^2}{S_{xx}}\right)} \qquad (5.34)$$

όπου η τιμή y_0 υπολογίζεται από το μοντέλο της παλινδρόμησης $\hat{y}_0 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0$. Επισημαίνεται ότι το εύρος του ορίου εμπιστοσύνης της μελλοντική τιμής y

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ελαχιστοποιείται όταν $x_0 = \bar{x}$ ενώ διευρύνεται όσο η ποσότητα $|x_0 - \bar{x}|$ αυξάνει. Συγκρίνοντας τις σχέσεις 5.35 και 5.33 γίνεται αντιληπτό ότι τα όρια εμπιστοσύνης που υπολογίζονται από την 5.35 είναι πάντοτε ευρύτερα από αυτά που υπολογίζονται με την 5.33 γιατί τα όρια εμπιστοσύνης για μια μελλοντική τιμή περιλαμβάνουν το σφάλμα που υπεισέρχεται στην κατασκευή του μοντέλου αλλά και το σφάλμα που υπεισέρχεται στη πραγματοποίηση μελλοντικών παρατηρήσεων (Montgomery et al., 2003).

5.8. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Ο καθορισμός ενός μοντέλου παλινδρόμησης προϋποθέτει αρκετές υποθέσεις. Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου προϋποθέτει την υπόθεση ότι τα σφάλματα είναι μη συσχετιζόμενες μεταβλητές με μέσο όρο **0** και σταθερή μεταβλητότητα. Ο έλεγχος των εναλλακτικών υποθέσεων καθώς και ο υπολογισμός των ορίων εμπιστοσύνης προϋποθέτουν την παραδοχή ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή. Επιπλέον γίνεται η παραδοχή ότι η τάξη του μοντέλου είναι σωστή δηλαδή στην απλή γραμμική παλινδρόμηση γίνεται η παραδοχή ότι το φαινόμενο περιγράφεται από μια ευθεία γραμμή ή ότι το φαινόμενο ακολουθεί πρώτης τάξης συμπεριφορά.

Ο μελετητής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την εγκυρότητα αυτών των υποθέσεων και να οργανώνει κριτήρια ανάλυσης που να περιγράφουν την ακρίβεια του μοντέλου (Montgomery et al., 1999).

5.8.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ

Τα υπόλοιπα ενός μοντέλου παλινδρόμησης υπολογίζονται από τη σχέση $e_i = y_i - \hat{y}_i$, i=1,2,…n, όπου το y_i είναι μια πραγματική παρατήρηση και $\hat{y}_i$ είναι η εκτίμηση της τιμής y_i όπως προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου. Η ανάλυση των υπολοίπων είναι χρήσιμη για τον έλεγχο της υπόθεσης ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή με σταθερή μεταβλητότητα και για τη συμπλήρωση του μοντέλου με επιπλέον όρους (Montgomery et al., 1999).

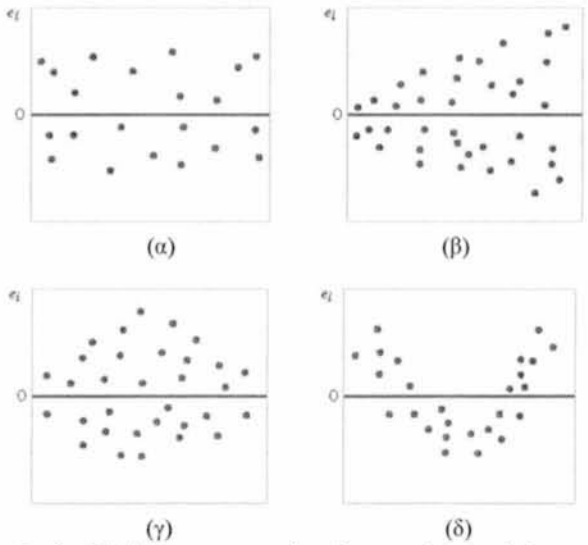
Για το σκοπό αυτό ο μελετητής είναι δυνατό να κατασκευάσει ένα διάγραμμα κανονικής πιθανότητας των υπολοίπων. Το γεγονός ότι πολλά προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή παρέχουν τη δυνατότητα σχεδιασμού διαγραμμάτων κανονικής πιθανότητας υπολοίπων αλλά και το γεγονός ότι το δείγμα τιμών από τις

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

οποίες υπολογίζεται το μοντέλο της παλινδρόμησης είναι συνήθως μικρό και δεν επαρκεί για το σχεδιασμό ιστογράμματος καθιστά τη μέθοδο του διαγράμματος κανονικής πιθανότητας ένα χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της ακρίβειας ενός μοντέλου παλινδρόμησης (Montgomery et al., 1999).

Τα υπόλοιπα είναι δυνατό να κανονικοποιηθούν με την εφαρμογή της σχέσης $d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}$,i= 1,2,…n. Εάν τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή τότε σχεδόν το 95% των κανονικοποιημένων υπολοίπων πρέπει να περιλαμβάνονται στο διάστημα (-2, +2). Όταν από τον υπολογισμό των υπολοίπων προκύψουν τιμές αυτών εκτός του διαστήματος (-2, +2) τότε το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι μεταξύ των παρατηρήσεων υπάρχουν τιμές που δεν είναι τυπικές του συνόλου των δεδομένων. Ωστόσο τέτοιες μη τυπικές τιμές δεν πρέπει να απορρίπτονται άμεσα γιατί πολλές φορές παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την παρουσία ασυνήθιστων καταστάσεων στην πορεία υλοποίησης ενός φαινομένου (Montgomery et al., 1999).

Συνήθως τα υπόλοιπα σχεδιάζονται σε συνάρτηση με το χρόνο (εάν είναι γνωστός) ή σε συνάρτηση με τα y_i ή σε συνάρτηση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές x όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4: Διάφορες απεικονίσεις διαγραμμάτων υπολοίπων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στην παραπάνω εικόνα ο τύπος απεικόνισης (α) παριστάνει την ιδανική περίπτωση ενώ οι απεικονίσεις (β), (γ) και (δ) παρουσιάζουν ανωμαλίες. Εάν το διάγραμμα των υπολοίπων σε συνάρτηση με το χρόνο έχει τη μορφή (β) τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταβλητότητα των παρατηρήσεων αυξάνει με το χρόνο ή με την αύξηση των y_i και των x_i. Συνήθως τέτοια προβλήματα εξαλείφονται με την μετατροπή των δεδομένων. Εάν τα διαγράμματα των υπολοίπων σε συνάρτηση με τα $\hat{y}_i$ και x_i έχουν τη μορφή (γ) τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταβλητότητα δεν έχει σταθερή τιμή. Εάν το διάγραμμα των υπολοίπων έχει τη μορφή (δ) τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μοντέλο δεν είναι κατάλληλο και απαιτείται είτε η προσθήκη όρων μεγαλύτερης τάξης, είτε η μετατροπή των y_i, είτε των x_i, είτε και των δύο ταυτόχρονα είτε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλο μοντέλο παλινδρόμησης (Montgomery et al., 1999).

5.8.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2)

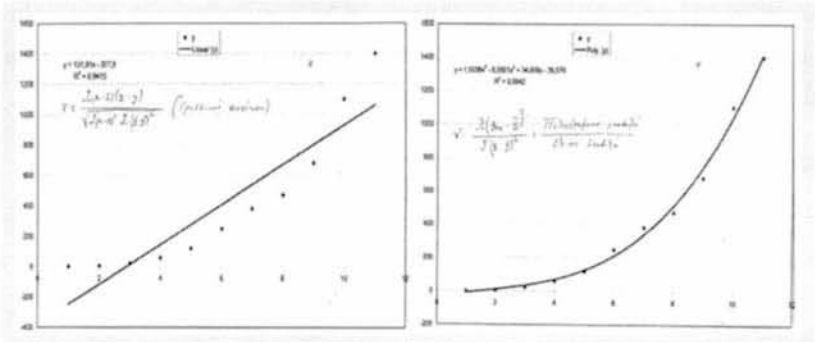
Η ποσότητα $$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = \frac{\Pi\alpha\lambda\iota\nu\delta\rho o\mu\iota\kappa\eta\mu\varepsilon\tau\alpha\beta o\lambda\eta}{O\lambda\iota\kappa\eta\mu\varepsilon\tau\alpha\beta o\lambda\acute{\eta}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_{\mu\beta x_i} - \bar{y}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)}$$

καλείται συντελεστής προσδιορισμού και χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η ακρίβεια του μοντέλου που προκύπτει από την εφαρμογή της παλινδρόμησης. Το R^2 είναι το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης των x και y όταν οι δύο αυτές μεταβλητές είναι τυχαίες. Από τις σχέσεις 5.25 και 5.26 προκύπτει ότι $0 \le R^2 \le 1$. Συνήθως, το R^2 εκφράζει την ποσότητα της μεταβλητότητας που εξηγείται ή υπολογίζεται από το μοντέλο της παλινδρόμησης (Montgomery et al., 2003).

Ο συντελεστής R^2 πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Για παράδειγμα είναι δυνατό να προκύψει ένα μοντέλο n-1 τάξης που να ταιριάζει n σημεία, τέλεια. Επιπλέον, το R^2 αυξάνεται κάθε φορά που προστίθεται μια μεταβλητή στο μοντέλο, αλλά κάθε νέα προσθήκη δεν εξασφαλίζει την ποιοτική βελτίωση του μοντέλου. Αναλυτικότερα, αν και το άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος ενός νέου μοντέλου ελαττώνεται κατά ένα παράγοντα ίσο με το πραγματικό άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος, το μοντέλο θα έχει μεγαλύτερο άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος από το παλαιό. Επομένως, το νέο μοντέλο είναι λιγότερο ποιοτικό από το παλαιό (Montgomery et al., 2003).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Υπάρχουν πολλές παρεξηγήσεις σχετικά με το συντελεστή R^2. Γενικά, το R^2 δεν περιγράφει το μέγεθος της κλίσης του μοντέλου και έτσι ένα R^2 που τείνει στη μονάδα δεν σημαίνει κατακόρυφη κλίση της ευθείας του μοντέλου παλινδρόμησης. Το R^2 δεν περιγράφει την καταλληλότητα του μοντέλου αφού τεχνητά μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας μεγαλύτερης τάξης όρους στο πολυώνυμο, ακόμη το R^2 είναι δυνατό να τείνει στη μονάδα, ενώ οι μεταβλητές x και y δεν συνδέονται γραμμικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5. Τελικά, μεγάλη τιμή του R^2 δεν συνεπάγεται ότι το μοντέλο είναι ικανό να δώσει προβλέψεις μελλοντικών παρατηρήσεων με μεγάλη ακρίβεια Montgomery et al., 2003).



Εικόνα 5.5: Τεχνητή αύξηση της τιμής του R^2 χωρίς αντίστοιχη βελτίωση του μοντέλου.

5.9. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Η μέχρι τώρα ανάλυση της παλινδρόμησης προϋποθέτει ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή του μοντέλου x είναι μια μαθηματική μεταβλητή με αμελητέο σφάλμα μέτρησης και ότι η εξαρτημένη μεταβλητή y είναι τυχαία μεταβλητή. Σε πολλές περιπτώσεις ανάπτυξης μοντέλων παλινδρόμησης οι μεταβλητές x και y είναι τυχαίες μεταβλητές (Montgomery et al., 2003).

Σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως γίνεται η παραδοχή ότι οι παρατηρήσεις (x_i,y_i), i=1,2,…n είναι και οι δύο τυχαίες μεταβλητές και ότι αυτές ακολουθούν δίπλευρη κανονική κατανομή. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι:

- μ_Y, σ^2_y είναι ο μέσος όρος και η μεταβλητότητα ή διασπορά του y,
- μ_X, σ^2_x είναι ο μέσος όρος και η μεταβλητότητα του x και
- ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των x και y, όπου το ρ υπολογίζεται από τη σχέση: $\rho = \dfrac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \dfrac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$ (5.35)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και σ_{XY} είναι η συμεταβλητότητα των x και y.

Η υποθετική κατανομή της εξαρτημένης μεταβλητής y για μία δοθείσα τιμή του x είναι:

$$f_{Y|x}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y|x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\beta_0-\beta_1 x}{\sigma_{Y|x}}\right)^2\right] \quad (5.36)$$

όπου: $\beta_0 = \mu_Y - \mu_x \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\rho$ (5.37)

$$\beta_1 = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\rho \quad (5.38)$$

και η υποθετική μεταβλητότητά της για την ίδια τιμή x είναι:

$$\sigma^2{}_{Y|x} = \sigma_Y^2\left(1-\rho^2\right) \quad (5.39)$$

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εξαρτημένη μεταβλητή y για την τιμή x ακολουθεί υποθετική κανονική κατανομή με μέσο όρο:

$$E(Y \mid x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (5.40)$$

και μεταβλητότητα $\sigma^2{}_{Y|x}$. Επομένως, ο μέσος όρος της υποθετικής κατανομής του y για το συγκεκριμένο x δίνεται από ένα απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Επιπλέον υπάρχει μια σχέση μεταξύ του συντελεστή συσχέτισης και της κλίσης β_1. Από την σχέση 5.38 προκύπτει ότι για $\rho=0$ $\beta_1=0$ και επομένως η γνώση του x δεν αρκεί για την πρόβλεψη του y (Montgomery et al., 2003).

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανότητας χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων β_0 και β_1. Μπορεί να αποδειχθεί ότι με βάση τη μέθοδο της μέγιστης πιθανότητας οι εκτιμητές των παραμέτρων β_0 και β_1 δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (5.41)$$

και $$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i\left(x_i - \bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (5.42)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι οι εκτιμητές της κλίσης β_1 και της απόστασης β_0 που δίνονται από τις εξισώσεις 5.41 και 5.42 είναι όμοιες με αυτές που προκύπτουν από την εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων, όταν τα x θεωρούνται ότι είναι μαθηματικές μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο της παλινδρόμησης με τα y και x να κατανέμονται κανονικά είναι ισοδύναμο με το μοντέλο στο οποίο τα x

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

θεωρούνται μαθηματικές μεταβλητές και προκύπτει από το γεγονός ότι οι τυχαίες μεταβλητές y για γνωστά x είναι ανεξάρτητες και κανονικά κατανεμόμενες μεταβλητές με μέσο όρο $\beta_0 + \beta_1 x$ και μεταβλητότητα $\sigma^2_{Y|x}$. Τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε ζεύγος (x,y) όταν η υποθετική κατανομή είναι κανονική (Montgomery et al., 2003).

Από κάθε μοντέλο είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για το συντελεστή συσχέτισης ρ. Ο συντελεστής συσχέτισης που προκύπτει από την ανάλυση ενός δείγματος αποτελεί την εκτίμηση του ρ και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \left(x_i - \bar{x}\right)}{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)^2 \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \bar{y}\right)^2\right]^{1/2}} = \frac{S_{xy}}{\left(S_{xx} S_{yy}\right)^{1/2}} \qquad (5.43)$$

Υπενθυμίζεται ότι: $\hat{\beta}_1 = \left(\frac{S_{yy}}{S_{xx}}\right)^{1/2} R$ (5.44)

οπότε από την σχέση 5.44 γίνεται αντιληπτό ότι η κλίση $\hat{\beta}_1$ εκφράζει το συντελεστή συσχέτισης R πολλαπλασιασμένο με ένα κλιμακωτό παράγοντα ο οποίος εκφράζει το πηλίκο της διασποράς των y, προς τη διασπορά των x. Επομένως τα R και $\hat{\beta}_1$ είναι στενά συνδεδεμένα αν και στην πραγματικότητα δίνουν διαφορετικές πληροφορίες. Αναλυτικά, το R μετρά τη γραμμική σχέση μεταξύ των y και x, ενώ το $\hat{\beta}_1$ μετρά την μεταβολή της προβλεπόμενης τιμής y για μοναδιαία μεταβολή του x. Όταν τα x είναι μαθηματικές μεταβλητές τότε ο υπολογισμός του R δεν έχει πρακτική αξία γιατί το μέγεθός του εξαρτάται από την επιλογή της διασποράς των x. Από την σχέση 5.44 προκύπτει ακόμα η σχέση:

$R^2 = \hat{\beta}_1^2 \frac{S_{xx}}{S_{yy}} = \frac{SS_R}{S_{yy}}$ η οποία δίνει τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 ο οποίος αποτελεί το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης των y και x (Montgomery et al., 2003).

Είναι συνήθως χρήσιμο να εξετάζεται η εναλλακτική υπόθεση:

H_0: $\rho = 0$

H_1: $\rho \neq 0$ (5.45)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Για την εξέταση της παραπάνω υποθέσεως εφαρμόζεται το στατιστικό κριτήριο T_0 το οποίο ακολουθεί t (Student) κατανομή με n-2 βαθμούς ελευθερίας όταν η υπόθεση H_0: ρ=0

είναι αληθής και υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_0 = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \tag{5.46}$$

Απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης γίνεται όταν $|t_0| \succ t_{\frac{\alpha}{2},n-2}$. Το κριτήριο Τ είναι ισοδύναμο με αυτό που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.5.1. Ωστόσο η τιμή του ρ δεν είναι πάντοτε 0. Σε αυτή την περίπτωση η εναλλακτική υπόθεση 5.46 μετατρέπεται στην ακόλουθη:

H_0: ρ=ρ_0
H_1: ρ≠ρ_0 (5.48)

στην οποία το $\rho_0 \neq 0$. Όταν ο αριθμός δειγμάτων είναι n≥25 τότε για τον έλεγχο της υπόθεσης 5.48 χρησιμοποιείται το στατιστικό κριτήριο Z. Σύμφωνα με το Fisher (1924) ο συντελεστής συσχέτισης δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Ωστόσο η μετασχηματισμένη μορφή του ακολουθεί την κανονική κατανομή Z με μέσο όρο $\hat{\mu}_Z = \frac{1}{2}\ln\frac{1+\hat{\rho}}{1-\hat{\rho}}$ και μεταβλητότητα $\hat{\sigma}_z^2 = (n-3)^{-1}$, όπου $e = \frac{e^{2\mu}-1}{e^{2\mu}+1}$.

Επομένως, για τον έλεγχο της υπόθεσης H_0: ρ=ρ_0 πρέπει να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο:

$$\frac{\hat{\mu}_z - E\left(\hat{\mu}_z\right)}{\sqrt{\hat{\sigma}_z^2}} = \frac{\hat{\mu}_z - \mu_z}{\hat{\sigma}_z} \tag{5.49}$$

και η H_0: ρ=ρ_0 απορρίπτεται όταν $|z_0| \succ z_{\frac{\alpha}{2}}$.

Τέλος είναι δυνατός ο καθορισμός ορίων εμπιστοσύνης του ρ για πιθανότητα 100(1-α)%. Τα όρια εμπιστοσύνης για την παραπάνω πιθανότητα δίνονται από τη σχέση:

$$\hat{\mu}_z - z_{1-\frac{\alpha}{2}}\hat{\sigma}_z \leq \mu_z \leq \hat{\mu}_z + z_{1+\frac{\alpha}{2}}\hat{\sigma}_z \tag{5.50}$$

(Montgomery et al., 2003).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

5.10. ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Η παλινδρόμηση χρησιμοποιείται ευρέως και συχνά γίνεται πλημμελής εφαρμογή της. Θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την προσεκτική επιλογή των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν και τον ορθολογικό καθορισμό της μορφής του μοντέλου. Η σωστή επιλογή των μεταβλητών περιορίζει την πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν μεταβλητές οι οποίες στατιστικά να συνδέονται ικανοποιητικά μεταξύ τους αλλά στην πράξη να είναι τελείως ασύνδετες (π.χ. επιλογή των μεταβλητών, αντοχή στη στρέβλωση διακεκομμένης ηλεκτροσυγκόλλησης μέταλλου και ελεύθερες θέσεις σε ένα χώρο στάθμευσης). Μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών που προκύπτει από την συλλογή παρατηρήσεων δεν σημαίνει ότι οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται και στην πράξη μεταξύ τους. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται συχνά στις θεωρητικές ανασκοπήσεις ανάλυσης δεδομένων ακόμη και σε πρακτικές εργασίες. Οι προσεκτικά σχεδιασμένες έρευνες είναι ο μόνος τρόπος να καθοριστεί η σχέση αιτίας – αποτελέσματος (Montgomery et al., 2003).

Η παλινδρόμηση είναι έγκυρη μόνο για τις τιμές των παλινδρομητών που βρίσκονται μεταξύ των τιμών των πραγματικών δεδομένων. Μια γραμμική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών μπορεί να είναι εφικτή εντός ενός διαστήματος πραγματικών τιμών x αλλά να μην υφίσταται όταν οι τιμές των x βρίσκονται εκτός αυτού του διαστήματος. Τα μοντέλα παλινδρόμησης δεν είναι απαραιτήτως έγκυρα για περιπτώσεις δεδομένων τα οποία υπολογίζονται κατά προσέγγιση. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι η εφαρμογή της παλινδρόμησης και σε περιπτώσεις δεδομένων που προκύπτουν από κατά προσέγγιση μετρήσεις πρέπει να αποφεύγεται πλήρως. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις προβλημάτων στην επιστήμη και την μηχανική στα οποία μόνο προσεγγίσεις μπορούν να γίνουν και επί αυτών να εφαρμοστεί η παλινδρόμηση. Ωστόσο, όταν απαιτείται να εφαρμοστεί μια τέτοια διαδικασία τότε θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Μια περιορισμένη εφαρμογή της μεθόδου των κατά προσέγγιση μετρήσεων μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά στην επίλυση πολλών προβλημάτων αλλά μια εκτεταμένη εφαρμογή της μεθόδου συνήθως οδηγεί σε μη αποδεκτά αποτελέσματα (Montgomery et al., 2003).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^{Ο}

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Δ. ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές φορές η ανάλυση παλινδρόμησης εφαρμόζεται σε έρευνες οι οποίες περιλαμβάνουν καταστάσεις στις οποίες υπάρχουν περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές (παλινδρομητές). Ένα τέτοιο μοντέλο που περιέχει περισσότερους από έναν παλινδρομητές καλείται πολλαπλό μοντέλο παλινδρόμησης.

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των παραγωγικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Το πρόβλημα το οποίο θα προκύψει είναι πολυπαραμετρικό και εντόνως μη γραμμικό. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος το μη γραμμικό μοντέλο γραμμικοποιήθηκε με κατάλληλους μετασχηματισμούς και στη συνέχεια στο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης (Multiple Regression). Στα επόμενα θα αναπτυχθεί η θεωρεία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

6.2. ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Ένα μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει περισσότερους του ενός παλινδρόμους ονομάζεται μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Γενικά, η εξαρτημένη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μεταβλητή y μπορεί να σχετίζεται με k ανεξάρτητες μεταβλητές ή παλινδρόμους. Το μοντέλο που περιγράφεται από τη σχέση:

$$y = \beta_o + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + ... + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (6.1)$$

ονομάζεται πολλαπλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης με k παλινδρόμους. Οι παράμετροι β_j, j=1,2,…k καλούνται συντελεστές παλινδρόμησης και αντιπροσωπεύουν την αναμενόμενη μεταβολή της απόκρισης y ανά μοναδιαία μεταβολή του x_j όταν όλες οι υπόλοιπες παλινδρομικές παράμετροι x_i ($i \neq j$) παραμένουν σταθερές. Ο όρος "γραμμικό" χρησιμοποιείται γιατί η εξίσωση 6.1 είναι μια γραμμική εξίσωση των άγνωστων παραμέτρων β_o, β_1,…, β_k. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται πολλαπλό γραμμικό μοντέλο με k παλινδρομικές μεταβλητές και περιγράφει ένα υπερεπίπεδο στον k-διάστατο χώρο των παλινδρομικών μεταβλητών x_j. Η γραφική απεικόνιση ενός πολλαπλού γραμμικού μοντέλου είναι δυνατό να δίνει την εντύπωση ότι το μοντέλο είναι μη γραμμικό. Γενικά, κάθε μοντέλο παλινδρόμησης το οποίο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους (τα β_j) είναι ένα γραμμικό μοντέλο ανεξάρτητα από το σχήμα της επιφάνειας που αυτό δημιουργεί. Πολλαπλά γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης συχνά χρησιμοποιούνται ως κατά προσέγγιση συναρτήσεις που σημαίνει ότι η αληθινή σχέση μεταξύ y και x_j όπου j=1,2,…k είναι άγνωστη, αλλά γύρω από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών των x_j το γραμμικό μοντέλο είναι μια επαρκής προσέγγιση (Montgomery et al., 2003).

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να εφαρμοστεί για να εκτιμήσει τους συντελεστές της παλινδρόμησης και στις περιπτώσεις πολλαπλών μοντέλων. Όταν είναι διαθέσιμες n>k παρατηρήσεις και θέτοντας x_{ij} έτσι ώστε να υποδηλώνει την i-οστή παρατήρηση ή επίπεδο της μεταβλητής x_j. Οι παρατηρήσεις καταγράφονται με τη μορφή: (x_{i1}, x_{i2},… x_{ik}, y_i), όπου i=1,2,…n και n>k. Ενδείκνυται τα δεδομένα να παραθέτονται σε πίνακες. Κάθε παρατήρηση (x_{i1}, x_{i2},… x_{ik}, y_i) ικανοποιεί την εξίσωση:

$$y = \beta_o + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + ... + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i = \beta_o + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \text{ , i=1,2,…,n} \quad (6.2)$$

Η εξίσωση των ελαχίστων τετραγώνων για την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση είναι:

$$L = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \beta_o - \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ij})^2 \quad (6.3)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Με εφαρμογή του θεωρήματος των Gauss-Markov, οι εκτιμήτριες ελαχίστων τετραγώνων πρέπει να ικανοποιούν τις εξισώσεις:

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_o}\Big|_{\hat{\beta}_o,\hat{\beta}_1,\ldots,\hat{\beta}_k} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{\beta}_o - \sum_{j=1}^{k}\hat{\beta}_j x_{ij}) = 0 \qquad (6.4\alpha)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j}\Big|_{\hat{\beta}_o,\hat{\beta}_1,\ldots,\hat{\beta}_k} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{\beta}_o - \sum_{j=1}^{k}\hat{\beta}_j x_{ij})x_{ij} = 0\ ,\ j=1,2,\ldots,k \qquad (6.4\beta)$$

Απλοποιώντας τις εξισώσεις 6.4 προκύπτουν οι παρακάτω κανονικές εξισώσεις των ελαχίστων τετραγώνων:

$$n\hat{\beta}_o + \hat{\beta}_1\sum_{i=1}^{n}x_{i1} + \hat{\beta}_2\sum_{i=1}^{n}x_{i2} + \ldots + \hat{\beta}_k\sum_{i=1}^{n}x_{ik} = \sum_{i=1}^{n}y_i$$

$$\hat{\beta}_o\sum_{i=1}^{n}x_{i1} + \hat{\beta}_1\sum_{i=1}^{n}x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2\sum_{i=1}^{n}x_{i1}x_{i2} + \ldots + \hat{\beta}_k\sum_{i=1}^{n}x_{i1}x_{ik} = \sum_{i=1}^{n}x_{i1}y_i$$

.....

.....

$$\hat{\beta}_o\sum_{i=1}^{n}x_{ik} + \hat{\beta}_1\sum_{i=1}^{n}x_{ik}x_{i1} + \hat{\beta}_2\sum_{i=1}^{n}x_{ik}x_{i2} + \ldots + \hat{\beta}_k\sum_{i=1}^{n}x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^{n}x_{ik}y_i \qquad (6.5)$$

Σημειώνεται ότι υπάρχουν ρ=κ+1 κανονικές εξισώσεις, μία για κάθε άγνωστο συντελεστή παλινδρόμησης, οι οποίες μπορούν να λυθούν με οποιαδήποτε μέθοδο επίλυσης γραμμικών εξισώσεων. Η λύση των παραπάνω εξισώσεων δίνει τις εκτιμήτριες $\hat{\beta}_0,\hat{\beta}_1,\ldots,\hat{\beta}_k$ της παλινδρόμησης (Montgomery et al., 2003).

6.2.1. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

Η διαδικασία προσαρμογής ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης απλουστεύεται όταν χρησιμοποιούνται πίνακες. Όταν είναι διαθέσιμες k παλινδρομικές παράμετροι και n παρατηρήσεις (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3},…, x_{ik}, y_i), i=1, 2,…..,n τότε το μοντέλο που προκύπτει θα έχει τη μορφή:

$$y_i = \beta_o + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \ldots\ldots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i\ ,\ i=1,2,\ldots..,n \qquad (6.6)$$

Αυτό το μοντέλο αποτελεί ένα σύστημα n εξισώσεων και μπορεί να εκφραστεί παραστατικά από πίνακες σύμφωνα με την σχέση:

$$\mathbf{Y=XB+E} \qquad (6.7)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

όπου $\mathbf{Y}=\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ . \\ . \\ y_n \end{bmatrix}$, $\mathbf{X}=\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & . & . & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & . & . & x_{2k} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & . & . & x_{n3} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}=\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ . \\ . \\ . \\ \beta_k \end{bmatrix}$ και $\mathbf{E}=\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ . \\ . \\ . \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$

Γενικά, **Y** είναι ένας (n × 1) πίνακας στήλη των παρατηρήσεων, **X** είναι ένας (n × p) πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, **B** είναι ένας (p × 1) πίνακας στήλη των συντελεστών της παλινδρόμησης και **E** είναι ένας (n × 1) πίνακας στήλη των τυχαίων σφαλμάτων.

Απαιτείται να βρεθεί ο πίνακας των ελαχίστων τετραγώνων των εκτιμητριών $\hat{\mathbf{B}}$ έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η εξίσωση $\mathbf{L}=\sum_{i=1}^{n} E_i^2 = \mathbf{E'E=(Y-XB)'(Y-XB)}$.

Το ελάχιστο τετράγωνο των εκτιμητριών $\hat{\mathbf{B}}$ αποτελεί τη λύση των **B** στις εξισώσεις $\frac{\partial L}{\partial B}=0$. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{X'X}\,\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{X'Y} \Leftrightarrow \hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{X'X})^{-1}\mathbf{X'Y} \tag{6.8}$$

όπου $\mathbf{(X'X)^{-1}}$ είναι ο αντίστροφος πίνακας του **(X'X)**. Σημειώνεται ότι υπάρχουν p=k+1 κανονικές εξισώσεις για p=k+1 αγνώστους (τιμές των $\hat{\mathbf{B}}$). Ο πίνακας **(X'X)** είναι πάντα διάφορος του μοναδιαίου και επομένως είναι δυνατή η εφαρμογή της θεωρίας πινάκων και οριζουσών για να βρεθεί ο $\mathbf{(X'X)^{-1}}$. Η προσέγγιση της διαδικασίας με την χρήση πινάκων είναι ισοδύναμη με την προσέγγιση με την κλίμακα εξισώσεων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_{i1} & \sum_{i=1}^{n} x_{i2} & . & . & \sum_{i=1}^{n} x_{ik} \\ \sum_{i=1}^{n} \chi_{i1} & \sum_{i=1}^{n} x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^{n} x_{i1}x_{i2} & . & . & \sum_{i=1}^{n} x_{i1}x_{ik} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ \sum_{i=1}^{n} \chi_{ik} & \sum_{i=1}^{n} x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^{n} x_{ik}x_{i2} & . & . & \sum_{i=1}^{n} x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_{i1}y_i \\ . \\ . \\ . \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ik}y_i \end{bmatrix} \tag{6.9}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Εκτελώντας τους πολλαπλασιασμούς στην εξίσωση 6.9 προκύπτει η κλίμακα εξισώσεων 6.5. Στην μορφή 6.9 είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο **(X΄X)** είναι ένας (p × p) συμμετρικός πίνακας ενώ ο **(X΄Y)** είναι ένας πίνακας στήλη (p × 1). Ο πίνακας **(X΄X)** παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι τα διαγώνια στοιχεία του αποτελούν το άθροισμα τετραγώνων των στοιχείων του πίνακα **X** και τα υπόλοιπα στοιχεία (εκτός διαγωνίου) αποτελούν το άθροισμα τετραγώνων των σταυρωτών γινομένων των στοιχείων του **X**. Επιπλέον, τα στοιχεία του πίνακα **(X΄Y)** αποτελούν το άθροισμα τετραγώνων των γινομένων των στοιχείων του πίνακα **X** με τα στοιχεία του πίνακα **Y**. Επομένως, το μοντέλο που προκύπτει θα έχει τη μορφή:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{n} \hat{\beta}_j x_{ij} \qquad i = 1, 2, \ldots, n \tag{6.10}$$

ή τη μορφή: $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}}$

Η διαφορά μεταξύ των παρατηρήσεων (στοιχεία του πίνακα **Y**) και των τιμών $\hat{y}_i$ του πίνακα $\hat{\mathbf{Y}}$ αποτελεί τα υπόλοιπα. Τα υπόλοιπα εκφράζονται από τη σχέση:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} \tag{6.11}$$

6.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΚΤΙΜΗΤΗ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ σ^2

Οι στατιστικές ιδιότητες των εκτιμητριών $\hat{\beta}_o, \hat{\beta}_1, \ldots, \hat{\beta}_k$ μπορούν να βρεθούν κάνοντας συγκεκριμένες υποθέσεις για τους όρους των σφαλμάτων ε_1, $\varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$ στο μοντέλο της παλινδρόμησης. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, γίνεται η υπόθεση ότι τα σφάλματα ε_i είναι στατιστικώς ανεξάρτητα με μέσο όρο 0 και μεταβλητότητα σ^2 και έτσι οι εκτιμήτριες $\hat{\beta}_o, \hat{\beta}_1, \ldots, \hat{\beta}_k$ είναι αμερόληπτες εκτιμήτριες των συντελεστών παλινδρόμησης $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k$. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται από την σχέση:

$$E\left(\hat{\beta}\right) = E[(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y}] = E[(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'(\mathbf{XB}+\varepsilon)] = E[(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{XB} + (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\varepsilon] = \mathbf{B}$$

στην οποία $E(\varepsilon)=0$ και $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{X}=\mathbf{I}$, μοναδιαίος πίνακας. Έτσι, οι τιμές του πίνακα $\hat{\mathbf{B}}$ αποτελούν αμερόληπτες εκτιμήτριες των τιμών του πίνακα **B** (Montgomery et al., 1999).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Οι μεταβλητότητες των $\hat{\beta}$ εκφράζονται στους όρους του αντίστροφου πίνακα **X'X**. Το γινόμενο του σ^2 επί τον αντίστροφο του **X'X** **[C=σ²(X'X)⁻¹]** αντιπροσωπεύει τον πίνακα της συμμεταβλητότητας των συντελεστών παλινδρόμησης $\hat{\beta}$. Για παράδειγμα εάν το k=2 (2 παλινδρομητές) τότε:

$$\mathbf{C=(X'X)^{-1}}=\begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \text{ και}$$

$Var(\hat{\beta}_j)=\sigma^2 C_{jj}$, όπου j=0,1,2 και

$Cov(\hat{\beta}_i,\hat{\beta}_j)=\sigma^2 C_{ij}$ με i≠j.

Ο πίνακας **C** είναι συμμετρικός αφού και ο **X'X** είναι συμμετρικός και το jj-οστό στοιχείο είναι η μεταβλητότητα του $\hat{\beta}_j$ ενώ το ij-οστό στοιχείο είναι η συμμεταβλητότητα των $\hat{\beta}_i$ και $\hat{\beta}_j$, δηλαδή:

$$Cov(\hat{\beta})=\sigma^2\,\mathbf{(X'X)^{-1}}$$

Οι εκτιμήσεις των συμμεταβλητοτήτων των συντελεστών παλινδρόμησης λαμβάνονται με αντικατάσταση του σ^2 με μια κατάλληλη εκτίμηση. Όταν συμβαίνει αυτό τότε η τετραγωνική ρίζα της εκτιμηθείσης μεταβλητότητας του j-οστού συντελεστή παλινδρόμησης καλείται εκτιμώμενο σφάλμα του $\hat{\beta}_j$ και δίνεται από την σχέση $S_e(\hat{\beta}_j)=\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}=\hat{\sigma}\sqrt{C_{jj}}$.

Όμοια με την απλή γραμμική παλινδρόμηση, το άθροισμα τετραγώνων των υπολοίπων δίνεται από τη σχέση $SS_E=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y})^2=\sum_{i=1}^{n}e_i^2$.

Μπορεί να δειχθεί ότι η αναμενόμενη τιμή της ποσότητας SS_E είναι $\sigma^2(n-2)$ και επομένως μια αμερόληπτη εκτίμηση της μεταβλητότητας σ^2 ορίζεται ως ακολούθως:

$$\hat{\sigma}^2=MS_E=\frac{SS_E}{n-p} \qquad (6.12)$$

Μπορεί να δειχθεί ότι:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$SS_E = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^{n} e_i = \mathbf{E'E}$ και αντικαθιστώντας όπου $\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{B}}$ προκύπτει ότι :

$$\mathbf{SS_E = Y'Y - B'\hat{X}'Y} \tag{6.13}$$

Επομένως η 6.12 γίνεται: $\hat{\sigma}^2 = MS_E = \frac{SS_E}{n-p} = \frac{\mathbf{Y'Y - B'\hat{X}'Y}}{n-p}$ (Montgomery et al., 1999).

Όπως και στην απλή γραμμική παλινδρόμηση έτσι και στην πολλαπλή είναι σημαντικό να υπολογιστεί η μεταβλητότητα σ^2 του σφάλματος. Υπενθυμίζεται ότι στην απλή γραμμική παλινδρόμηση, στην οποία υπάρχουν δύο παράμετροι, το σ^2 υπολογίζεται από το πηλίκο του αθροίσματος τετραγώνου των υπολοίπων προς τον παράγοντα n-2. Στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με p παραμέτρους η εκτίμηση του σ^2 δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}{n-p} = \frac{SS_E}{n-p} \tag{6.14}$$

Το $\hat{\sigma}$ αποτελεί μια αμερόληπτη εκτιμήτρια της μεταβλητότητας σ^2. Όπως και στην απλή γραμμική παλινδρόμηση το $\hat{\sigma}$ προκύπτει από την ανάλυση της μεταβλητότητας του μοντέλου παλινδρόμησης. Ο αριθμητής της εξίσωσης 6.14 ονομάζεται άθροισμα τετραγώνων των υπολοίπων, ενώ ο παρονομαστής ονομάζεται βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος ή βαθμοί ελευθερίας των υπολοίπων (Montgomery et al., 1999).

6.4. ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Στα προβλήματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι έλεγχοι υποθέσεων, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την μέτρηση της επάρκειας του μοντέλου. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται οι σημαντικότερες διαδικασίες ελέγχου υπόθεσης. Όπως και στην περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, ο έλεγχος υπόθεσης απαιτεί ο όρος του σφάλματος να κατανέμεται κανονικά και ανεξάρτητα με μέσο όρο **0** και μεταβλητότητα $\boldsymbol{\sigma^2}$(Montgomery et al., 1999).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

6.4.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Οι έλεγχοι σημαντικότητας της παλινδρόμησης αποτελούν ένα κριτήριο για το εάν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής y και ενός υποσυνόλου των παλινδρομικών μεταβλητών $x_1, x_2,\ldots,x_k$. Η κατάλληλη υπόθεση είναι:

H_0: $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_k=0$ (Μηδενική υπόθεση)

H_1: $\beta_j\neq 0$ για τουλάχιστο ένα j (Εναλλακτική) (6.15)

Όταν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση H_0: $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_k=0$ τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι μία τουλάχιστο από τις παλινδρομικές παραμέτρους $x_1, x_2,\ldots,x_k$ συνεισφέρει σημαντικά στο μοντέλο (Montgomery et al., 1999).

Ο έλεγχος σημαντικότητας της παλινδρόμησης αποτελεί μια γενίκευση της διαδικασίας που χρησιμοποιείται στην απλή γραμμική παλινδρόμηση. Το συνολικό άθροισμα τετραγώνων S_{yy} επιμερίζεται στο άθροισμα τετραγώνων που οφείλεται στην παλινδρόμηση και σε αυτό που οφείλεται στο σφάλμα. Παραστατικά δίνεται από την σχέση $S_{yy} = SS_R + SS_E$.

Αν η μηδενική υπόθεση H_0: $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_k=0$ είναι αληθής, τότε $\frac{SS_R}{\sigma^2}$ είναι μια X^2 τυχαία μεταβλητή με k βαθμούς ελευθερίας. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας της ποσότητας $\frac{SS_R}{\sigma^2}$ είναι ίσος με τον αριθμό των παλινδρομικών μεταβλητών. Μπορεί να αποδειχθεί ότι και η ποσότητα $\frac{SS_E}{\sigma^2}$ είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί X^2 κατανομή με n-p βαθμούς ελευθερίας και ότι τα SS_E και SS_R είναι ανεξάρτητα. Έτσι, το στατιστικό κριτήριο που εφαρμόζεται για τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης H_0: $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_k=0$ είναι το κριτήριο F και δίνεται από τη σχέση:

$$F_0 = \frac{\frac{X_1^2}{k}}{\frac{X_2^2}{n-p}} = \frac{\frac{SS_R}{k}}{\frac{SS_E}{n-p}} = \frac{MS_R}{MS_E}, \text{ όπου } \nu_1 = k \text{ και } \nu_2 = n\text{-}p \qquad (6.16)$$

Η υπόθεση H_0 απορρίπτεται όταν η τιμή του F_0 είναι μεγαλύτερη από την τιμή ελέγχου F_{α,ν_1,ν_2}. Ολόκληρη η διαδικασία συνοψίζεται στον πίνακα ανάλυσης της μεταβλητότητας ο οποίος έχει τη μορφή του Πίνακα 6.1 (Montgomery et al., 1999).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πίνακας 6.1: Πίνακας Ανάλυσης Παραλλακτικότητας Πολλαπλής Παλινδρόμησης

Πηγή της Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνα	Κριτήριο F_0
Παλινδρόμηση	SS_R	$v_1 = k$	MS_R	$\frac{MS_R}{MS_E}$
Σφάλμα ή Υπόλοιπα	SS_E	$v_2 = n-p$	MS_E	
Σύνολο	SS_T	$n-1$		

Το SS_E υπολογίζεται από τη σχέση: $SS_E = \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \mathbf{E}'\mathbf{E}$ στην οποία $\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{B}}$. Από τις δύο αυτές εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\mathbf{SS_E} = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - \mathbf{B}'\hat{\mathbf{X}}'\mathbf{Y} \tag{6.17}$$

Η εξίσωση 6.17 μπορεί να ξαναγραφεί ως: $SS_E = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n} - \left[\hat{\mathbf{B}}'\mathbf{X}'\mathbf{Y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}\right]$ ή $SS_E = S_{yy} - SS_R$ ενώ το S_{yy} δίνεται από τη σχέση $S_{yy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})}{n} = \sum_{i=1}^{n} y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n} = \mathbf{Y}'\mathbf{Y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}$. Από τις τρεις αυτές εξισώσεις προκύπτει ότι το SS_R δίνεται από τη σχέση:

$$SS_R = \hat{\mathbf{B}}'\mathbf{X}'\mathbf{Y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n} \tag{6.18}$$

(Montgomery et al., 1999).

6.4.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2) ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2_{ADJ})

Για τον έλεγχο καταλληλότητας ενός μοντέλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί το R^2, το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} = \frac{\Pi\alpha\lambda\iota\nu\delta\rho o\mu\iota\kappa\acute{\eta}\mu\epsilon\tau\alpha\beta o\lambda\acute{\eta}}{O\lambda\iota\kappa\acute{\eta}\mu\epsilon\tau\alpha\beta o\lambda\acute{\eta}} \tag{6.19}$$

όπου $0 \le R^2 \le 1$. Το R^2 εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας που περιγράφεται από ένα μοντέλο, δηλαδή εάν είναι R^2=0,98 εξάγεται το συμπέρασμα ότι το 98% της μεταβλητότητας μιας εξαρτημένης μεταβλητής περιγράφεται από το μοντέλο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο προηγούμενο κεφάλαιο, η χρήση του R^2 για τον έλεγχο καταλληλότητας ενός μοντέλου πρέπει να γίνεται με προσοχή γιατί κάθε φορά που προστίθεται μια νέα παλινδρομική μεταβλητή το R^2 αυξάνει χωρίς το μοντέλο να παρουσιάζει αντίστοιχη βελτίωση (Montgomery et al., 2003).

Πολλοί ερευνητές προτιμούν αντί του R^2 το προσαρμοσμένο R^2_{ADJ}. Το R^2_{ADJ} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R^2_{ADJ} = 1 - \frac{\frac{SS_E}{n-p}}{\frac{S_{yy}}{n-1}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}}\left(\frac{n-1}{n-p}\right) \qquad (6.20)$$

Επειδή ο αριθμητής της εξίσωσης 6.20 αποτελεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολοίπων (mean square error, mse) και ο παρονομαστής παραμένει σταθερός το R^2_{ADJ} αυξάνει με την προσθήκη μιας νέας παλινδρομικής μεταβλητής μόνο στην περίπτωση που η νέα αυτή μεταβλητή μειώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Montgomery et al., 2003).

Ο προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για τον ερευνητή κάθε φορά που αυτός επιθυμεί να προσθέσει μια επιπλέον παλινδρομική μεταβλητή. Η χρήση του R^2_{ATJ} περιορίζει την πιθανότητα να προστεθεί μια μεταβλητή η οποία δεν είναι απαραίτητη για την βελτίωση του μοντέλου (Montgomery et al., 2003).

6.4.3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΕ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Η ΟΜΑΔΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

Συχνά ενδιαφέρει ο έλεγχος υπόθεσης των συντελεστών παλινδρόμησης, χωριστά για τον καθένα. Τέτοιοι έλεγχοι μπορεί να είναι χρήσιμα στον καθορισμό της δυναμικής τιμής της καθεμιάς από τις παλινδρομικές μεταβλητές του μοντέλου της παλινδρόμησης. Για παράδειγμα το μοντέλο μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό με την χρήση επιπρόσθετων μεταβλητών ή ίσως με την διαγραφή μιας ή περισσοτέρων παραμέτρων που ήδη παρουσιάζονται στο μοντέλο. Προσθέτοντας μια μεταβλητή σε ένα μοντέλο συνήθως προκύπτει μια αύξηση του αθροίσματος τετραγώνου του σφάλματος. Θα πρέπει τότε να διερευνηθεί εάν η αύξηση του αθροίσματος τετραγώνων της παλινδρόμησης είναι αρκετά μεγάλη τόσο που να δικαιολογείται η προσθήκη μιας επιπλέον μεταβλητής στο μοντέλο. Επιπλέον, προσθέτοντας μια ασήμαντη μεταβλητή στο μοντέλο μπορεί να αυξηθεί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, γεγονός που δείχνει ότι η προσθήκη μίας τέτοιας μεταβλητής καθιστά το μοντέλο φτωχότερο ως προς την περιγραφή των δεδομένων (Montgomery et al., 2003).

Η υπόθεση ελέγχου της σημαντικότητας για κάθε μεμονωμένο συντελεστή παλινδρόμησης β_j είναι:

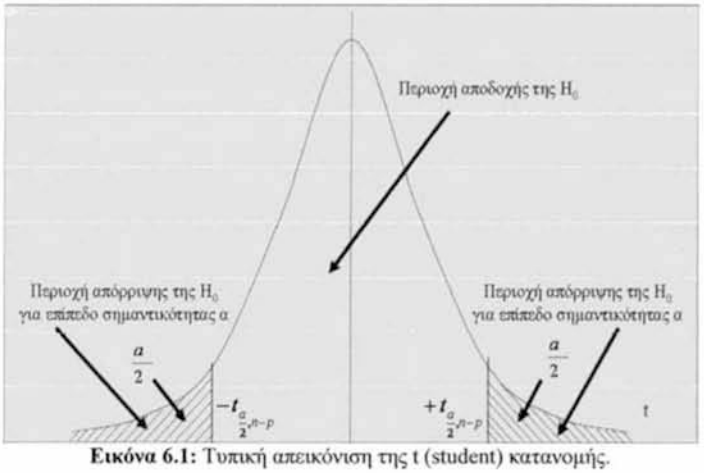
H_0: $\beta_j=0$

H_1: $\beta j\neq 0$ (6.21)

Αν η H_0: $\beta_j=0$ δεν απορριφθεί τότε ο παλινδρομητής x_j θα πρέπει να απαλειφτεί από το μοντέλο. Το στατιστικό κριτήριο αυτής της υπόθεσης είναι:

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} = \frac{\hat{\beta}_j}{\hat{\sigma}\sqrt{C_{jj}}} \qquad (6.22)$$

όπου C_{jj} είναι τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$ που αντιστοιχούν στο $\hat{\beta}_j$. Σημειώνεται ότι ο παρονομαστής της εξίσωσης 6.21 είναι το σταθερό σφάλμα του συντελεστή παλινδρόμησης $\hat{\beta}_j$. Η μηδενική υπόθεση, H_0: $\beta_j=0$, απορρίπτεται εάν $|t_0| > t_{\frac{a}{2},n-p}$. Αυτό καλείται μερικός ή περιθωριακός έλεγχος επειδή ο συντελεστής παλινδρόμησης $\hat{\beta}_j$ εξαρτάται από όλες τις υπόλοιπες παλινδρομικές μεταβλητές x_j ($i\neq j$) που εμφανίζονται στο μοντέλο. Μια τυπική απεικόνιση της t (Student) κατανομής φαίνεται στην Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Τυπική απεικόνιση της t (student) κατανομής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Υπάρχει και άλλος τρόπος ελέγχου της συνεισφοράς ενός μεμονωμένου παλινδρομητή στο μοντέλο. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση μια αύξηση του αθροίσματος τετραγώνων της παλινδρόμησης που προκύπτει από την προσθήκη μιας μεταβλητής x_i στο μοντέλο, δεδομένου ότι άλλες μεταβλητές x_i $(i \neq j)$ περιλαμβάνονται ήδη στην εξίσωση της παλινδρόμησης. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται γι αυτό ονομάζεται γενικός έλεγχος σημαντικότητας παλινδρόμησης ή μέθοδος του πρόσθετου αθροίσματος των τετραγώνων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ερευνηθεί η συνεισφορά ενός υποσυνόλου παλινδρομικών μεταβλητών στο μοντέλο. Έστω ότι ένα μοντέλο παλινδρόμησης περιλαμβάνει k παλινδρομικές μεταβλητές και έχει τη μορφή:

$$\mathbf{Y}=\mathbf{XB}+\mathbf{E} \tag{6.23}$$

όπου **Y** είναι (nx1), **X** είναι (nxp), **B** είναι (px1), **E** είναι (nx1) και p=k+1. Πρέπει να καθοριστεί εάν το υποσύνολο των παλινδρομικών μεταβλητών $x_1, x_2, x_3, \ldots x_r$ (r<k) ως σύνολο, συνεισφέρει σημαντικά στο μοντέλο της παλινδρόμησης. Γίνεται η υπόθεση ότι οι συντελεστές παλινδρόμησης χωρίζονται ως εξής:

$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}\mathbf{B}_1\\ \mathbf{B}_2\end{bmatrix} \tag{6.24}$$

όπου $\mathbf{B}_1$ είναι (rx1)και $\mathbf{B}_2$ είναι [(p-r)x1]. Η υπόθεση που διατυπώνεται είναι:

H_0: $\mathbf{B}_1=\mathbf{0}$

H_1: $\mathbf{B}_1\neq\mathbf{0}$ (6.25)

όπου **0** είναι ο μηδενικός πίνακας. Το μοντέλο μπορεί να γραφεί:

$$\mathbf{Y}=\mathbf{XB}+\mathbf{E}=\mathbf{X}_1\mathbf{B}_1+\mathbf{X}_2\mathbf{B}_2+\mathbf{E} \tag{6.26}$$

όπου $\mathbf{X}_1$ αντιπροσωπεύει τις στήλες του **X** που σχετίζονται με το $\mathbf{B}_1$ και $\mathbf{X}_2$ αντιπροσωπεύει τις στήλες του **X** που σχετίζονται με το $\mathbf{B}_2$ (Montgomery et al., 2003).

Για το γενικό μοντέλο (το οποίο περιλαμβάνει και το $\mathbf{B}_1$ και το $\mathbf{B}_2$) είναι γνωστό ότι $\hat{\mathbf{B}}=(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y}$. Επιπροσθέτως, το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης για όλες τις μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένου της αλληλεπίδρασης είναι:

$\mathbf{SS}_R(\mathbf{B})=\hat{\mathbf{B}}\,\mathbf{X}'\mathbf{Y}$ (p=k+1 βαθμοί ελευθερίας) και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$MS_E = \frac{\mathbf{Y'Y} - \hat{\mathbf{B}}\,\mathbf{X'Y}}{n-p}$$

Η ποσότητα $SS_R(B) = \hat{\mathbf{B}}\,\mathbf{X'Y}$ αποτελεί το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης που οφείλεται στους συντελεστές **B**. Για να βρεθεί η συνεισφορά των όρων $\mathbf{B_1}$ στην παλινδρόμηση, πρέπει να γίνει προσαρμογή του μοντέλου με την παραδοχή ότι η υπόθεση H_0: $\mathbf{B_1=0}$ είναι αληθής. Το μοντέλο που απομένει δίνεται από την εξίσωση 6.26 και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{Y=X_2B_2 + E} \qquad (6.27)$$

Η εκτιμήτρια του B_2 είναι η $\hat{\mathbf{B}}_2$ δίνεται από την εξίσωση

$\hat{\mathbf{B}}_2 = (\mathbf{X}_2'\mathbf{X}_2)^{-1}\mathbf{X}_2'\mathbf{Y}$ και το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης που οφείλεται στο $\mathbf{B_2}$ δίνεται από την εξίσωση

$$SS_R(\mathbf{B}_2) = \hat{\mathbf{B}}_2\,\mathbf{X}_2'\mathbf{Y} \quad \text{(p-r βαθμοί ελευθερίας)} \qquad (6.28)$$

Το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης που οφείλεται στους συντελεστές $\mathbf{B_1}$ δεδομένου ότι το $\mathbf{B_2}$ βρίσκεται ήδη στο μοντέλο, είναι:

$$SS_R(\mathbf{B}_1 \mid \mathbf{B}_2) = SS_R(\mathbf{B}) - SS_R(\mathbf{B}_2) \qquad (6.29)$$

Το άθροισμα τετραγώνων που δίνεται από τη σχέση 6.29 έχει r βαθμούς ελευθερίας. Μερικές φορές ονομάζεται πρόσθετο άθροισμα τετραγώνων που οφείλεται στο $\mathbf{B_1}$. Σημειώνεται ότι η ποσότητα $SS_R(\mathbf{B}_1 \mid \mathbf{B}_2)$ αποτελεί την αύξηση του αθροίσματος τετραγώνων της παλινδρόμησης που οφείλεται στις παραμέτρους $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_r$ που περιλαμβάνονται το μοντέλο. Η ποσότητα αυτή είναι ανεξάρτητη του μέσου τετραγώνου των υπολοίπων ή του σφάλματος MS_E και η υπόθεση H_0: $\mathbf{B_1=0}$ μπορεί να ελεχθεί με το στατιστικό κριτήριο

$$F_0 = \frac{\dfrac{SS_R(\mathbf{B}_1 \mid \mathbf{B}_2)}{r}}{MS_E} \qquad (6.30)$$

Εάν για την τιμή του F, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση 6.30, ισχύει $F_0 > f_{\alpha,r,n-p}$ και η μηδενική υπόθεση απορριφθεί, τότε συνεπάγεται ότι τουλάχιστο μια από τις παραμέτρους με συντελεστές B_1 είναι διαφορετική από το **0** και επομένως τουλάχιστο μια από τις μεταβλητές $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_r$ του συνόλου $\mathbf{X_1}$ συνεισφέρει

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σημαντικά στο μοντέλο της παλινδρόμησης. Το παραπάνω κριτήριο ονομάζεται μερικό F-test.

Το μερικό F-test είναι πολύ χρήσιμο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί η συνεισφορά κάθε μεμονωμένης παραμέτρου x_j σαν να ήταν η τελευταία μεταβλητή που προστίθεται στο μοντέλο υπολογίζοντας την ποσότητα:

$SS_R(\beta_j|\ \beta_0, \beta_1,\ldots,\beta_{j-1}, \beta_{j+1}, \ldots, \beta_k),\ j=1,2,\ldots,k$

Η ποσότητα αυτή εκφράζει την αύξηση του αθροίσματος τετραγώνων της παλινδρόμησης που οφείλεται στο προστιθέμενο x_j σε ένα μοντέλο που ήδη περιλαμβάνει $x_1, x_2,\ldots, x_{j-1}, x_{j+1}, x_k$. Το μερικό F-test αποτελεί μια γενικότερη διαδικασία στην οποία είναι δυνατό να μετρηθεί η επίδραση ομάδων μεταβλητών. (Montgomery et al., 2003).

6.5. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

6.5.1. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τους Montgomery and Runger (2003), στα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης είναι συνήθως χρήσιμο να υπολογίζονται εκτιμήτριες των ορίων εμπιστοσύνης για τους συντελεστές της παλινδρόμησης β_j. Η ανάπτυξη της διαδικασίας για τον υπολογισμό αυτών των ορίων προϋποθέτει ότι το σφάλμα είναι κανονικά και ανεξάρτητα κατανεμημένο με μέσο όρο 0 και μεταβλητότητα σ^2. Δηλαδή απαιτείται να γίνει η ίδια παραδοχή με αυτή που έγινε στον έλεγχο των υποθέσεων. Ως εκ τούτου οι παρατηρήσεις Y_i είναι κανονικά και ανεξάρτητα κατανεμημένες με μέσο όρο $\beta_0 + \sum \beta_j x_{ij}$ και μεταβλητότητα σ^2. Επειδή η εκτιμήτρια $\hat{B}$ αποτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό των παρατηρήσεων, συνεπάγεται ότι η $\hat{\mathbf{B}}$ ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο όρο το διάνυσμα **B** και πίνακα συμμεταβλητότητα το $\sigma^2(\mathbf{X'X})^{-1}$. Επομένως καθένα από τα στατιστικά κριτήρια:

$$T=\frac{\hat{\beta}_j-\beta_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}}=\frac{\hat{\beta}_j}{\hat{\sigma}\sqrt{C_{jj}}},\quad j=0, 1, 2, \ldots, k \qquad (6.31)$$

ακολουθεί t (Student) κατανομή με n-p βαθμούς ελευθερίας, όπου C_{jj} είναι το jj-οστό στοιχείο του πίνακα $(\mathbf{X'X})^{-1}$ και $\hat{\sigma}^2$ είναι η εκτιμήτρια της μεταβλητότητας σ^2

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

του σφάλματος που λαμβάνεται από την εξίσωση 6.14. Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι για ποσοστό 100(1-α), τα όρια εμπιστοσύνης των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης β_j, j=0, 1, 2, …., k, δίνονται από την σχέση:

$$\hat{\beta}_j - t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \le \beta_j \le \hat{\beta}_j + t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \quad \text{ή} \quad \hat{\beta}_j \pm \hat{\sigma} t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{C_{jj}} \tag{6.32}$$

6.5.2. ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Είναι δυνατό να υπολογιστούν τα όρια εμπιστοσύνης της μέσης απόκρισης σε ένα συγκεκριμένο σημείο x_{01}, x_{02}, …., x_{0k}. Για να γίνει εκτίμηση της μέσης απόκρισης σε αυτό το σημείο πρέπει να οριστεί το διάνυσμα:

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ x_{01} \\ x_{02} \\ . \\ . \\ x_{0k} \end{bmatrix}$$

Η μέση απόκριση σε αυτό το σημείο δίνεται από τη σχέση $E(\mathbf{Y} \mid x_0) = \mu_{Y|x_0} = \mathbf{X}_0'\mathbf{B}$

και η οποία υπολογίζεται από τη σχέση: $\hat{\mu}_{Y|x_0} = \mathbf{X}_0'\hat{\mathbf{B}}$ (6.33)

Η εκτιμήτρια αυτός είναι αμερόληπτη αφού $E(\mathbf{X}_0'\hat{\mathbf{B}}) = \mathbf{X}_0'\mathbf{B} = E(\mathbf{Y} \mid x_0) = \mu_{Y|x_0}$ ενώ η μεταβλητότητα του $\hat{\mu}_{Y|x_0}$ είναι:

$$Var(\hat{\mu}_{Y|x_0}) = \sigma^2 \mathbf{X}_0'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0 \tag{6.34}$$

Για συντελεστή εμπιστοσύνης 100(1-α), το παρακάτω στατιστικό κριτήριο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό ορίων εμπιστοσύνης στο $\mu_{Y|x_0}$:

$$\frac{\hat{\mu}_{Y|x_0} - \mu_{Y|x_0}}{\sqrt{\sigma^2 \mathbf{X}_0'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0}} \tag{6.35}$$

Για το μοντέλο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, το όριο εμπιστοσύνης για συντελεστή100(1-α) ποσοστό ορίων εμπιστοσύνης της μέσης απόκρισης στα σημεία x_{01}, x_{02}, …., x_{0k} είναι:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} - t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2\,\mathbf{X}_0'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0} \le \mu_{Y|x_0} \le \hat{\mu}_{Y|x_0} + t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2\,\mathbf{X}_0'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0} \quad \text{ή}$$

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} \pm t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\,\hat{\sigma}\sqrt{\mathbf{X}'_0(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0} \qquad (6.36)$$

Η εξίσωση 6.36 αποτελεί όριο εμπιστοσύνης του παλινδρομικού υπερεπιπέδου. Αποτελεί την γενίκευση της εξίσωσης 5.33 (Montgomery et al., 2003).

6.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΝΕΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Ένα μοντέλο παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει πρόβλεψη μιας νέας ή μελλοντικής παρατήρησης της μεταβλητής Y, η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών $x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0k}$. Αν είναι $\mathbf{X_0}=[1, x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0k}]$ τότε ένα σημείο πρόβλεψης της μελλοντικής παρατήρησης $\mathbf{Y_0}$ στο σημείο $\mathbf{X_0}$ θα είναι:

$$\hat{\mathbf{Y}}_0 = \mathbf{X}'_0\,\hat{\mathbf{B}} \qquad (6.37)$$

Για συντελεστή εμπιστοσύνης 100(1-α)%, τα όρια εμπιστοσύνης μιας μελλοντικής παρατήρησης δίνονται από τη σχέση:

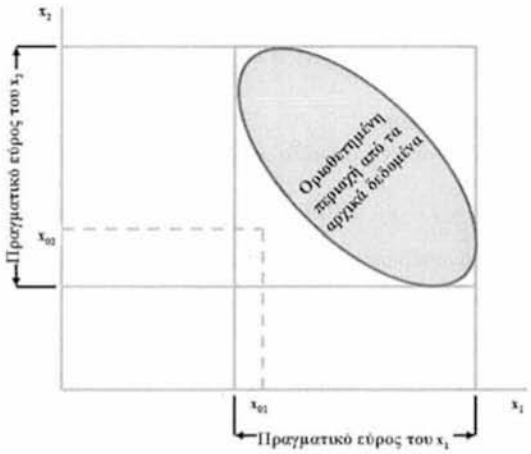
$$\hat{y}_0 - t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left[1+\mathbf{X}'_0(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0\right]} \le y_0 \le \hat{y}_0 + t_{\frac{\alpha}{2},n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2\left[1+\mathbf{X}'_0(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_0\right]} \qquad (6.38)$$

Αυτό το όριο πρόβλεψης αποτελεί γενίκευση των ορίων πρόβλεψης που δίνονται από την εξίσωση 5.35 για μια μελλοντική παρατήρηση σε μια απλή γραμμική παλινδρόμηση. Εάν γίνει σύγκριση των ορίων πρόβλεψης που δίνονται από την εξίσωση 6.38 με τα όρια εμπιστοσύνης του μέσου όρου που δίνονται από την εξίσωση 6.36 συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα όρια πρόβλεψης είναι ευρύτερα από τα αντίστοιχα όρια εμπιστοσύνης. Τα όρια εμπιστοσύνης εκφράζουν το σφάλμα στην εκτίμηση της μέσης κατανομής, ενώ τα όρια πρόβλεψης εκφράζουν το σφάλμα πρόβλεψης μιας μελλοντικής τιμής από την κατανομή στο σημείο X_0. Το όριο πρόβλεψης περιλαμβάνει τόσο το σφάλμα στην εκτίμηση του μέσου όρου, στο σημείο αυτό, όσο και την ενυπάρχουσα μεταβλητότητα της τυχαίας μεταβλητής Y για την ίδια τιμή $\mathbf{X}=\mathbf{X_0}$.

Οι κατά προσέγγιση υπολογισμοί για την πρόβλεψη νέων παρατηρήσεων και τον υπολογισμό της μέσης απόκρισης, σε ένα δεδομένο σημείο $x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0k}$, πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή όταν μάλιστα αυτοί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

πραγματοποιούνται εκτός της περιοχής η οποία περιλαμβάνει τις αρχικές παρατηρήσεις. Είναι πολύ πιθανό το μοντέλο που ταιριάζει στην περιοχή με τα αρχικά δεδομένα να μην ταιριάζει κατάλληλα για δεδομένα εκτός αυτής της περιοχής. Στην πολλαπλή παλινδρόμηση είναι συνήθως εύκολο να γίνουν υπολογισμοί κατά προσέγγιση, ακούσια, αφού τα επίπεδα των μεταβλητών (x_{i1}, x_{i2}, …, x_{ik}), ι=1, 2, …, m, από κοινού ορίζουν την περιοχή που περικλείει τα δεδομένα. Για παράδειγμα στην Εικόνα 6.2 απεικονίζεται η περιοχή που περιλαμβάνει τις παρατηρήσεις για ένα μοντέλο παλινδρόμησης με δύο μεταβλητές. Σημειώνεται ότι το σημείο (x_{01}, x_{02}) βρίσκεται μεταξύ του εύρους των δύο παλινδρομικών μεταβλητών x_1, x_2 αλλά είναι εκτός της περιοχής που πρακτικά καθορίζονται από τις αρχικές παρατηρήσεις. Έτσι, είτε εφαρμόζεται η διαδικασία πρόβλεψης της τιμής μιας νέας παρατήρησης είτε εφαρμόζεται η διαδικασία εκτίμησης της μέσης απόκρισης σε αυτό το σημείο, αποτελούν έναν κατά προσέγγιση υπολογισμό του αρχικού μοντέλου παλινδρόμησης (Montgomery et al., 2003).



Εικόνα 6.2: Περιοχή οριοθέτησης ενός μοντέλου παλινδρόμησης με δύο μεταβλητές.

6.7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ένας αριθμός διαφορετικών τεχνικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της επάρκειας ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

6.7.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (R^2)

Ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού (R^2) ορίζεται ως εξής:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} = \frac{\Pi\alpha\lambda\iota\nu\delta\rho o\mu\iota\kappa\ \eta\ \mu\varepsilon\tau\alpha\beta o\lambda\ \eta}{O\lambda\iota\kappa\eta\ \mu\varepsilon\tau\alpha\beta o\lambda\ \eta} \quad (6.39)$$

όπου R^2 αποτελεί μια μέτρηση της συνολικής μείωσης της μεταβλητότητας του Y που προκύπτει από τη χρήση των παλινδρομικών μεταβλητών $x_1, x_2,\ldots, x_k$. Όπως και στην περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης το εύρος τιμών του συντελεστή προσδιορισμού κυμαίνετε μεταξύ 0 και 1. Ωστόσο μια μεγάλη τιμή του R^2 δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι το μοντέλο παλινδρόμησης είναι καλό. Προσθέτοντας μια μεταβλητή στο μοντέλο συνήθως αυξάνεται το R^2 άσχετα με το εάν η μεταβλητή αυτή είναι στατιστικώς σημαντική ή όχι. Έτσι, τα μοντέλα που έχουν μεγάλες τιμές του R^2 μπορεί να δίνουν φτωχές προβλέψεις των νέων παρατηρήσεων ή εκτιμήσεις της μέσης απόκρισης.

Η θετική τετραγωνική ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού ονομάζεται πολλαπλός συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του Y και του συνόλου των παλινδρομικών μεταβλητών $x_1, x_2,\ldots, x_k$. Δηλαδή το R αποτελεί μια μέτρηση της γραμμικής σχέσης μεταξύ Y και $x_1, x_2,\ldots, x_k$. Όταν k=1 τότε προκύπτει η απλή συσχέτιση μεταξύ Y και x(Montgomery et al., 2003).

6.7.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ

Ο όρος υπόλοιπο, σε ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, ο οποίος ορίζεται ως $e_i = y_i - \hat{y}_i$, παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέταση της επάρκειας του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε ήδη στην παράγραφο 5.8.1, αρκετά διαγράμματα υπολοίπων είναι συχνά χρήσιμα. Είναι, επίσης, χρήσιμο να σχεδιάζονται διαγράμματα υπολοίπων ως προς μεταβλητές που δεν συμμετέχουν στο μοντέλο οι οποίες είναι πιθανές υποψήφιες μεταβλητές για να συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Πρότυπα τέτοιων διαγραμμάτων τα οποία είναι παρόμοια με εκείνα της Εικόνας 5.4 δείχνουν ότι το μοντέλο μπορεί να αποδίδεται καλύτερα προσθέτοντας μια τέτοια υποψήφια μεταβλητή.

Σε διάφορες περιπτώσεις κατασκευής μοντέλων χρησιμοποιούνται τα τυποποιημένα υπόλοιπα $d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} = \frac{e_i}{\sqrt{MS_E}}$ για τον υπολογισμό του μεγέθους των υπολοίπων. Πολλοί αναλυτές προτιμούν να σχεδιαγραφούν τυποποιημένα υπόλοιπα αντί των συνηθισμένων υπολοίπων, επειδή τα τυποποιημένα είναι βαθμονομημένα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και η τυποποιημένη απόκλιση προσεγγίζει τη μονάδα. Έτσι, μεγάλα υπόλοιπα, τα οποία μπορεί να δείχνουν πιθανά εμπόδια ή ασυνήθιστες παρατηρήσεις, είναι δυνατό να εμφανίζονται από την μελέτη των διαγραμμάτων υπολοίπων (Montgomery et al., 2003).

Πολλά προγράμματα Η/Υ παλινδρόμησης υπολογίζουν άλλους τύπους βαθμονομημένων υπολοίπων. Ένα από τα ποιο κοινά είναι το στοχαστικό υπόλοιπο, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$r_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(1-h_{ii})}}, \quad i=1, 2,\ldots, n \tag{6.40}$$

όπου h_{ii} είναι το i-οστό διαγώνιο στοιχείο του πίνακα $\mathbf{H}=\mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'$. Ο πίνακας **H** πολλές φορές καλείται πίνακας «καπέλο (hat)» επειδή ισχύει $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{X}\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{Y}$. Έτσι, ο πίνακας **H** μετασχηματίζει τις παρατηρούμενες τιμές Y σε διανυσματικές τιμές $\hat{\mathbf{Y}}$, οι οποίες ταιριάζουν στο μοντέλο.

Αφού κάθε γραμμή του πίνακα **X** αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα $\mathbf{X}_i=[1, x_{i1}, x_{i2},\ldots, x_{ik}]$ τότε ένας άλλος τρόπος για να γράψουμε τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα **H** είναι:

$$h_{ii} = \mathbf{X}_i'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}_i \tag{6.41}$$

Σημειώνεται, ότι άσχετα με το σ^2, το κάθε h_{ii} στοιχείο αποτελεί την μεταβλητότητα των προσαρμοσμένων τιμών $\hat{Y}_i$. Οι ποσότητες h_{ii} χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης της μέσης απόκρισης στην παράγραφο 6.5.2.

Λαμβάνοντας υπόψη τις υποθέσεις ότι το σφάλμα του μοντέλου είναι ανεξάρτητα κατανεμημένο με μέσο όρο **0** και μεταβλητότητα $\boldsymbol{\sigma^2}$ μπορεί να αποδειχθεί ότι η μεταβλητότητα του i-οστού υπολοίπου e_i είναι: $Var(e_i) = \sigma^2(1-h_{ii})$, i= 1, 2, …., n. Επιπλέον, τα h_{ii} στοιχεία πρέπει να ικανοποιούν τον περιορισμό $0<h_{ii}\leq 1$. Αυτό σημαίνει ότι τα τυποποιημένα υπόλοιπα υποεκτιμούν το μέγεθος των υπολοίπων. Έτσι, το τυποποιημένο υπόλοιπο θα ήταν καλύτερα, από στατιστικής απόψεως, να εξετάζει τα εκτιμώμενα εμπόδια που μπορεί να εμφανίζονται. Δηλαδή, αν για παράδειγμα δύο από τα υπόλοιπα ενός

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μοντέλου ήταν e_{15}=5.88, e_{17}=4.33, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα MS_E=5.2352 και $h_{15,15}$= 0.0737, $h_{17,17}$=0.2593 τότε τα τυποποιημένα υπόλοιπα θα ήταν:

$$d_{15} = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} = \frac{e_i}{\sqrt{MS_E}} = \frac{5.88}{\sqrt{5.2352}} = 2.57\,,\; d_{17} = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} = \frac{e_i}{\sqrt{MS_E}} = \frac{4.33}{\sqrt{5.2352}} = 1.89$$

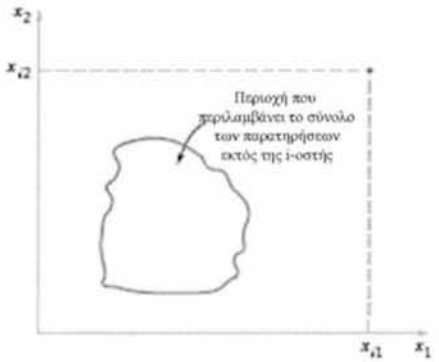
Ενώ τα αντίστοιχα στοχαστικά υπόλοιπα θα ήταν:

$$r_{15} = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(1-h_{ii})}} = \frac{5.88}{\sqrt{5.2352(1-0.0737)}} = 2.67\,, r_{17} = \frac{4.33}{\sqrt{5.2352(1-0.02593)}} = 2.20$$

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα στοχαστικά υπόλοιπα είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα τυποποιημένα. Ωστόσο, τα τυποποιημένα υπόλοιπα έχουν τιμές τέτοιες ώστε να μην προκαλούν σοβαρή ανησυχία γύρω από τα πιθανά εμπόδια (Montgomery et al., 2003).

6.7.3. ΚΥΡΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όταν χρησιμοποιείται η πολλαπλή παλινδρόμηση, συχνά διαπιστώνεται ότι ορισμένα υποσύνολα παρατηρήσεων είναι ασυνήθιστα σημαντικά. Μερικές φορές αυτές οι παρατηρήσεις είναι σχετικά μακριά από τις γειτονικές περιοχές όπου παρατηρούνται τα υπόλοιπα δεδομένα. Μια υποθετική κατάσταση για δύο μεταβλητές παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.3 όπου μια παρατήρηση στο διάστημα μεταξύ των x οριοθετείται από τα υπόλοιπα δεδομένα. Η διάταξη των σημείων στο διάστημα μεταξύ των x είναι σημαντικό για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του μοντέλου. Για παράδειγμα τα σημεία (x_{i1}, x_{i2}) στην Εικόνα 6.3 μπορεί να είναι πολύ σημαντικά στον καθορισμό του R^2 της εκτίμησης των συντελεστών παλινδρόμησης και του μεγέθους του μέσου τετραγώνου του σφάλματος.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση σημείου εκτός της περιοχής που οριοθετούν τα x.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στα επόμενα θα γίνει προσπάθεια να εξεταστεί εάν τα σημαντικά σημεία καθορίζουν πολλές από τις ιδιότητες του μοντέλου. Εάν τα σημαντικά σημεία είναι «κακά» σημεία ή λανθασμένα θα πρέπει να εξαλείφονται. Από την άλλη πλευρά μπορεί να μην υπάρχει κάποιο λάθος σε αυτά τα σημεία αλλά τουλάχιστο απαιτείται να καθοριστεί εάν αυτά παράγουν ή όχι αποτελέσματα σύμφωνα με τα υπόλοιπα δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση ακόμη και αν ένα σημαντικό σημείο είναι καθοριστικό, εάν ελέγχει σε σημαντικό βαθμό τις ιδιότητες του μοντέλου απαιτείται να είναι γνωστό αφού μπορεί να έχει επίδραση στη χρήση του μοντέλου.

Μια εξαίρετη διαγνωστική μέθοδος είναι η μέτρηση της απόστασης του Cook (Cook's Distance) (Cook, 1977,1979). Αυτή είναι μια μέτρηση του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των συνηθισμένων ελάχιστων τετραγώνων που εκτιμούν το **B** και βασίζονται στις n παρατηρήσεις και της εκτίμησης που λαμβάνεται όταν το i-οστό σημείο που αποσύρεται, π.χ. το $\mathbf{B}_i$. Η μέτρηση της απόστασης κατά Cook δίνεται από τη σχέση:

$$D_i = \frac{\left(\hat{\mathbf{B}}_i - \hat{\mathbf{B}}\right)\mathbf{X}'\mathbf{X}\left(\hat{\mathbf{B}}_i - \hat{\mathbf{B}}\right)}{p\hat{\sigma}^2}, \quad i=1, 2,\ldots\ldots,n$$

Αναλυτικότερα, αν το i-οστό σημείο είναι σημαντικό, η απομάκρυνσή του μπορεί να προκαλέσει στο B_i σχετική αλλαγή ως προς την τιμή $\hat{\mathbf{B}}$. Έτσι, μια μεγάλη τιμή του D_i σημαίνει ότι το i-οστό σημείο είναι σημαντικό. Το στατιστικό μέγεθος D_i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D_i = \frac{r_i^2}{p}\frac{h_{ii}}{(1-h_{ii})}, \quad i=1, 2, \ldots, n \qquad (6.42)$$

Από την εξίσωση 6.42 συνάγεται το συμπέρασμα ότι το D_i αποτελείται από τετραγωνικά στοχαστικά υπόλοιπα τα οποία αντικατοπτρίζουν αφ' ενός το πόσο καλά ταιριάζει το μοντέλο την i-οστή παρατήρηση Y_i (υπενθυμίζεται ότι $r_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(1-h_{ii})}}$) και αφ' ετέρου ένα παράγοντα ο οποίος μετρά το πόσο μακριά βρίσκεται αυτό το σημείο από τα υπόλοιπα δεδομένα. Η ποσότητα $\frac{h_{ii}}{1-h_{ii}}$ εκφράζει την μέτρηση της απόστασης του i-οστού σημείου από το κέντρο των υπολοίπων n-1 σημείων. Μια τιμή του $D_i > 1$ μπορεί να δείχνει ότι το σημείο είναι σημαντικό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Καθένας από τους δύο παράγοντες του D_i (ή και οι δύο) μπορεί να συνεισφέρουν σε μια μεγάλη τιμή (Montgomery et al., 2003).

6.8. ΜΟΡΦΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

6.8.1. ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Το γραμμικό μοντέλο που περιγράφεται από την εξίσωση $\mathbf{Y=X\beta+\varepsilon}$ είναι ένα γενικό μοντέλο που εφαρμόζεται για να εκφράσει κάθε γραμμική σχέση ως προς τις άγνωστες παραμέτρους β συμπεριλαμβανομένου του βαθμού του πολυωνύμου. Για παράδειγμα, το πολυώνυμο δεύτερου βαθμού ως προς μια μεταβλητή:

$$Y=\beta_0+\beta_1x+\beta_{11}x^2+\varepsilon \quad (6.43)$$

και το πολυώνυμο δεύτερου βαθμού ως προς δύο μεταβλητές

$$Y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_{11}x_1^2+\beta_{22}x_2^2+\beta_{12}x_1x_2+\varepsilon \quad (6.44)$$

είναι γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης.

Τα πολυωνυμικά μοντέλα παλινδρόμησης είναι ευρέως διαδεδομένα όταν η απόκριση είναι καμπυλόγραμμη, επειδή μπορούν να εφαρμοστούν οι γενικές αρχές της πολλαπλής παλινδρόμησης.

Ως προς την έκφραση δεδομένων με πολυώνυμα, γενικά, χρησιμοποιείται το μοντέλο μικρότερου βαθμού. Στο παραπάνω παράδειγμα θα έπρεπε να εξεταστεί η πιθανότητα τα δεδομένα να εκφράζονται ικανοποιητικά από ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού αντί του αντίστοιχου δευτεροβάθμιου. Έτσι, η υπόθεση ελέγχου Θα μπορούσε να διαμορφωθεί ως εξής:

H_0: $\beta_{11}=0$

H_1: $\beta_{11}\neq0$

Ο γενικός έλεγχος παλινδρόμησης μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της παραπάνω υπόθεσης. Απαιτείται να γίνει έλεγχος του επιπλέον αθροίσματος τετραγώνων που οφείλονται στο β_{11}, ή $SS_R(\beta_{11}|\beta_1,\beta_0)=SS_R(\beta1,\beta_{11}|\beta_0) - SS_R(\beta_1|\beta_0)$ (Montgomery et al., 2003).

6.8.2. ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΕΙΚΤΕΣ

Τα μοντέλα παλινδρόμησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω βασίστηκαν σε ποσοτικές μεταβλητές, δηλαδή, μεταβλητές οι οποίες μπορούν να μετρηθούν σε αριθμητική κλίμακα. Για παράδειγμα, μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η απόσταση και το ηλεκτρικό δυναμικό αποτελούν ποσοτικές μεταβλητές. Μερικές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

φορές, απαιτείται να ενσωματωθούν ποιοτικές παλινδρομικές μεταβλητές στο μοντέλο παλινδρόμησης. Ένα παράδειγμα ποιοτικής μεταβλητής σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης θα μπορούσε να είναι ο παρατηρητής που ασχολείται με τις παρατηρήσεις Y_i. Εάν γίνει η υπόθεση ότι συμμετέχουν δύο παρατηρητές τότε θα πρέπει να μελετηθεί η τυχόν διαφορετική επίδραση του καθένα στην απόκριση.

Η συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης των διαφορετικών επιπέδων μιας ποιοτικής μεταβλητής είναι η χρήση μεταβλητών-δεικτών. Για παράδειγμα, για να καθοριστεί η επίδραση δύο διαφορετικών παρατηρητών σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης, θα μπορούσε να οριστεί η μεταβλητή-δείκτης:

$$X=\begin{cases} 0 \text{ εάν η παρατήρηση προέρχεται από τον παρατηρητή 1} \\ 1 \text{ εάν η παρατήρηση προέρχεται από τον παρατηρητή 2} \end{cases}$$

Γενικά, μια ποιοτική μεταβλητή με r-επίπεδα μπορεί να μοντελοποιηθεί με r-1 μεταβλητές-δείκτες, οι οποίες λαμβάνουν την τιμή 0 ή 1. Έτσι, εάν υπάρχουν τρείς παρατηρητές και δύο μεταβλητές-δείκτες τότε τα διαφορετικά επίπεδα θα ήταν:

X_1	X_2	
0	0	εάν η παρατήρηση προέρχεται από τον παρατηρητή 1
1	0	εάν η παρατήρηση προέρχεται από τον παρατηρητή 2
0	1	εάν η παρατήρηση προέρχεται από τον παρατηρητή 3

Οι μεταβλητές-δείκτες αναφέρονται και ως εικονικές μεταβλητές.

Επίσης είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί μια μεταβλητή-δείκτης για να ερευνηθεί πως ο τύπος ενός εργαλείου επηρεάζει την κλίση και την απόσταση μιας ευθείας από τον άξονα των x. Για παράδειγμα, έστω ότι ένα μοντέλο έχει τη μορφή: $Y= \beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_1x_2+\varepsilon$, όπου το x_2 είναι η μεταβλητή-δείκτης. Εάν ο ένας τύπος εργαλείου είναι ο 302 και το $x_2=0$ τότε το μοντέλο γράφεται: $Y=\beta_0+\beta_1x_1+\varepsilon$, ενώ εάν ο τύπος του εργαλείου είναι ο 416 και το $x_2=1$ τότε το μοντέλο γίνεται:

$Y= \beta_0+\beta_1x_1+\beta_2+\beta_3x_1+\varepsilon=(\beta_0+\beta_2)+(\beta_1+\beta_3)x_1+\varepsilon$

Σημειώνεται ότι το β_2 είναι η μεταβολή της απόστασης από τον άξονα των x και το β_3 είναι η κλίση που προκύπτει από την αλλαγή του τύπου του εργαλείου.

Μια εναλλακτική μέθοδος ανάλυσης αυτών των δεδομένων είναι να γίνει προσαρμογή διαφορετικών μοντέλων στα δεδομένα του κάθε τύπου εργαλείου. Ωστόσο, προσέγγιση με τη μεταβλητή-δείκτη παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Πρώτον, μόνο ένα μοντέλο απαιτείται να εξαχθεί από τη μελέτη των δεδομένων. Δεύτερον, με την μελέτη των δεδομένων ως προς και τους δύο τύπους εργαλείων, οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος αυξάνονται. Τρίτον, οι έλεγχοι και των δυο υποθέσεων ως προς τις παραμέτρους β_2 και β_3 αποτελούν ιδιαίτερες περιπτώσεις της μεθόδου των πρόσθετων αθροισμάτων τετραγώνου (Montgomery et al., 2003).

6.9. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατασκευή ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι η επιλογή του συνόλου των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν. Προηγούμενη εμπειρία του ερευνητή μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή του κατάλληλου συνόλου. Συνήθως, το πρόβλημα συνίσταται στην επιλογή του κατάλληλου υποσυνόλου μεταβλητών, από το σύνολο των μεταβλητών που θεωρούνται σημαντικές, για το οποίο υπάρχει η βεβαιότητα ότι περιγράφουν ικανοποιητικά την απόκριση Υ.

Σε μια τέτοια περίπτωση, ο ερευνητής ενδιαφέρεται για την επιλογή των μεταβλητών. Με τον όρο επιλογή μεταβλητών περιγράφεται η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου συνόλου μεταβλητών, οι οποίες θα συμμετάσχουν στην κατασκευή του μοντέλου παλινδρόμησης. Απαιτείται το μοντέλο να περιλαμβάνει ικανό αριθμό μεταβλητών, έτσι ώστε να αποδίδει όσο το δυνατό καλύτερα κατά τη χρήση του σε πιθανές μελλοντικές προβλέψεις. Παράλληλα, για να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα το κόστος χρήσης και διατήρησης του συγκεκριμένου μοντέλου αλλά και να παραμένει εύχρηστο απαιτείται να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατό λιγότερες μεταβλητές. Η διαδικασία επίτευξης των παραπάνω στόχων αποτελεί την λεγόμενη αναζήτηση της βέλτιστης εξίσωσης παλινδρόμησης. Ωστόσο, τα περισσότερα προβλήματα δεν είναι δυνατό να περιγραφούν κατά τον καλύτερο τρόπο από ένα απλό μοντέλο λόγω των διαφορετικών κριτηρίων εκτίμησης που προτείνονται. Η διαθέσιμη εμπειρία και η κατάλληλη κρίση, για το σύστημα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί, αποδεικνύονται ικανές για την επιλογή της κατάλληλης μεταβλητής που θα περιληφθεί στην εξίσωση παλινδρόμησης.

Δεν υπάρχει κάποιος απλός αλγόριθμος για την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών που θα περιληφθούν σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης. Οι περισσότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα απαιτούν την κρίση του ερευνητή. Στα επόμενα θα περιγραφούν μερικές από τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Έστω ότι υπάρχουν Κ υποψήφιες μεταβλητές, x_1, x_2, x_3, ….., x_K, και μια εξαρτημένη μεταβλητή Υ. Όλα τα μοντέλα θα περιλαμβάνουν έναν όρο β_0, ο οποίος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εκφράζει την απόσταση της εξίσωσης από τον άξονα των x και όλες τις υποψήφιες μεταβλητές, δηλαδή θα αποτελείται από K+1 όρους. Επιπλέον, κάθε υποψήφια μεταβλητή μπορεί να εμφανίζεται με οποιαδήποτε μαθηματική μορφή ($x = \frac{1}{x}$, x=lnx, κ.α.) (Montgomery et al., 2003).

6.9.1. ΌΛΕΣ ΟΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΕΙΣ

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, ο ερευνητής μελετά όλες τις πιθανές εξισώσεις παλινδρόμησης οι οποίες περιλαμβάνουν μια μεταβλητή, στη συνέχεια μελετά τις εξισώσεις παλινδρόμησης με δύο μεταβλητές κ.ο.κ. Έπειτα στο σύνολο των εξισώσεων που θα προκύψει, εφαρμόζονται κατάλληλα κριτήρια έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη εξίσωση. Εάν υπάρχουν K υποψήφιες μεταβλητές τότε οι εξισώσεις που θα εξεταστούν είναι 2^K. Επομένως, όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός μοντέλου, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των εξισώσεων που θα εξεταστούν ως προς την καταλληλότητά τους. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμοι, στα διάφορα προγράμματα στατιστικής ανάλυσης, μερικοί πολύ αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για την μελέτη όλων των πιθανών εξισώσεων παλινδρόμησης. Έτσι, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά πρακτική εκτός και αν ο αριθμός των υποψήφιων μεταβλητών είναι πολύ μεγάλος.

Υπάρχουν πολλά κριτήρια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση και σύγκριση των διαφορετικών μοντέλων παλινδρόμησης. Ένα από τα κριτήρια είναι αυτό που βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής του R^2 ή του R^2_{adj}. Ο ερευνητής συνεχίζει να προσθέτει μεταβλητές στο μοντέλο ώσπου η αύξηση της τιμής του R^2 ή του R^2_{adj} να είναι μικρή. Συχνά, διαπιστώνεται ότι η τιμή του R^2_{adj} σταθεροποιείται και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται όσο προστίθενται νέες μεταβλητές στο μοντέλο. Συνήθως, το μοντέλο για το οποίο το R^2_{adj} έχει τη μέγιστη τιμή θεωρείται το καλύτερο μοντέλο παλινδρόμησης. Επειδή ισχύει:

$R^2_{AΔJ} = 1 - \frac{MS_E}{\frac{S_{YY}}{n-1}}$ όπου ο παρονομαστής $\frac{S_{YY}}{n-1}$ είναι σταθερός, τότε το μοντέλο το οποίο μεγιστοποιεί την τιμή του R^2_{adj} ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το μέσο τετράγωνο του σφάλματος. Επομένως, το συγκεκριμένο είναι ένα πολύ ελκυστικό κριτήριο επιλογής μεταβλητών σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Ένα άλλο κριτήριο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι το C_p στατιστικό κριτήριο. Το κριτήριο αυτό εκφράζει το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα του μοντέλου παλινδρόμησης. Το συνολικό τυποποιημένο μέσο τετράγωνο του σφάλματος ενός μοντέλου παλινδρόμησης ορίζεται ως εξής:

$$\Gamma_\rho = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{E}\left[\hat{Y}_i - E(Y_i)\right]^2 = \frac{1}{\sigma^2}\left\{\sum_{i=1}^{n}[E(Y_i) - E(\hat{Y})]^2 + \sum_{i=1}^{n} Var(\hat{Y}_i)\right\} =$$

$$= \frac{1}{\sigma^2}[(\mu\varepsilon\rho o\lambda\eta\psi\iota\alpha)^2 + \mu\varepsilon\tau\alpha\beta\lambda\eta\tau\acute{o}\tau\eta\tau\alpha]$$

Για την εκτίμηση του σ^2 χρησιμοποιείται το μέσο τετράγωνο του σφάλματος για το μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τους K+1 όρους. Έτσι, η εκτίμηση του Γ_ρ δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{SS_E(p)}{\hat{\sigma}^2} - n + 2p \qquad (6.45)$$

Εάν ο p-όρος παρουσιάζει λογικό αρχικό σφάλμα τότε μπορεί να δειχθεί ότι:

$E(C_p|\text{μηδενική μεροληψία}) = p$

Έτσι, οι τιμές του C_p για κάθε μοντέλο παλινδρόμησης που εξετάζεται μπορεί να εκτιμηθούν σε σχέση με το p. Οι εξισώσεις παλινδρόμησης οι οποίες παρουσιάζουν λογικό αρχικό σφάλμα έχουν τιμές του C_p κοντά στις τιμές του p ενώ σε εκείνες τις εξισώσεις στις οποίες το αρχικό σφάλμα είναι σημαντικό, οι τιμές του C_p είναι σημαντικά μεγαλύτερες από την τιμή p. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο η καταλληλότερη εξίσωση παλινδρόμησης είναι εκείνη η οποία παρουσιάζει το ελάχιστο C_p ή εκείνη με τιμή C_p ελαφρώς μεγαλύτερη η οποία όμως δεν περιλαμβάνει πολλά αρχικά σφάλματα ($C_p \approx p$).

Το στατιστικό κριτήριο PRESS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση και σύγκριση ενός μοντέλου παλινδρόμησης. Ο όρος PRESS είναι μια συντομογραφία των αγγλικών λέξεων Prediction Error Sum of Squares (Πρόβλεψη του αθροίσματος τετραγώνων) και ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων των διαφορών της κάθε παρατήρησης Y_i με την αντίστοιχη πρόβλεψη, η οποία προκύπτει από το μοντέλο που περιγράφει τα n-1 σημεία που απομένουν, έστω $\hat{Y}_{(i)}$. Επομένως , το κριτήριο PRESS δίνει μια μέτρηση του πόσο καλή πρόβλεψη νέων δεδομένων ή δεδομένων τα οποία δεν χρησιμοποιούνται στην

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κατασκευή της παλινδρομικής εξίσωσης μπορεί να δώσει το μοντέλο. Η σχέση υπολογισμού του κριτηρίου αυτού είναι:

$$PRESS = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2$$

όπου $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ είναι τα συνήθη υπόλοιπα. Έτσι, το κριτήριο PRESS μπορεί να υπολογιστεί από τα τυπικά ελάχιστα τετράγωνα της παλινδρόμησης. Μοντέλα των οποίων οι τιμές PRESS είναι μικρές είναι τα επιθυμητά (Montgomery et al., 2003).

6.9.2. ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Η σταδιακή επιλογή μεταβλητών σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης αποτελεί την ευρύτερα διαδεδομένη μέθοδο. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται η κατασκευή διαδοχικών μοντέλων με προσθήκη ή απαλοιφή μεταβλητών σε κάθε στάδιο. Το κριτήριο για την προσθήκη ή απαλοιφή μιας μεταβλητής, σε κάθε στάδιο, εκφράζεται με το μερικό F-τεστ, συνήθως. Έστω, ότι η τιμή του F για την προσθήκη μιας μεταβλητής, στο μοντέλο, είναι F_{in} και η αντίστοιχη τιμή για την απαλοιφή της είναι η F_{out}. Μεταξύ των τιμών F_{in} και F_{out} θα πρέπει να ισχύει $F_{in} \geq F_{out}$, αλλά συνήθως είναι $F_{in} = F_{out}$.

Η διαδοχική επιλογή μεταβλητών ξεκινά μορφοποιώντας ένα μοντέλο μιας μεταβλητής, η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την απόκριση Y ή την μεγαλύτερη τιμή F-κριτηρίου. Έστω ότι στο πρώτο βήμα επιλέγεται η μεταβλητή x_1 να συμμετέχει στο μοντέλο. Στο δεύτερο βήμα εξετάζονται οι K-1 υποψήφιες μεταβλητές που απομένουν, και η μεταβλητή για την οποία το μερικό F-κριτήριο

$$F_j = \frac{SS_R(\beta_j \mid \beta_1 \beta_0)}{MS_E(x_j, x_1)} \qquad (6.46)$$

αποκτά τη μέγιστη τιμή, προστίθεται στο μοντέλο, δεδομένου ότι θα ισχύει $F_j > F_{in}$. Στην εξίσωση 6.46 ο παρονομαστής δηλώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τις μεταβλητές x_1 και x_2. Έστω ότι από την διαδικασία προκύπτει πως η μεταβλητή x_2 πρέπει να προστεθεί στο μοντέλο. Ο αλγόριθμος της διαδοχικής επιλογής μεταβλητών καθορίζει το εάν η μεταβλητή x_1 που προστέθηκε στο μοντέλο κατά το προηγούμενο βήμα πρέπει να μετακινηθεί ή όχι. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται το F-κριτήριο:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

$$F_1 = \frac{SS_R(\beta_1 \mid \beta_2 \beta_0)}{MS_E(x_1, x_2)} \tag{6.47}$$

Εάν ισχύει $F_1 < F_{out}$ τότε η μεταβλητή x_1 απομακρύνεται από το μοντέλο, αλλιώς παραμένει και συνεχίζεται η μελέτη για την προσθήκη μεταβλητής στο μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει ήδη τις δύο μεταβλητές x_1 και x_2. Γενικά, σε κάθε βήμα εξετάζεται το σύνολο των υποψήφιων μεταβλητών που απομένει και αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή του μερικού F-κριτηρίου, για την οποία ισχύει $F > F_{in}$, προστίθεται στο μοντέλο, ενώ αυτή με τη μικρότερη τιμή F, για την οποία ισχύει $F < F_{out}$, απαλείφεται από το μοντέλο. Η διαδικασία συνεχίζεται ώσπου καμία επιπλέον μεταβλητή να μην μπορεί να προστεθεί ή να απομακρυνθεί από το μοντέλο.

Η διαδοχική επιλογή μεταβλητών παλινδρόμησης πραγματοποιείται με τη βοήθεια στατιστικών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο ερευνητής επεμβαίνει στην διαδικασία επιλογής των μεταβλητών επιλέγοντας τις τιμές των F_{in} και F_{out}. Μερικά προγράμματα Η/Υ απαιτούν τον καθορισμό των τιμών των F σε κάθε βήμα επειδή οι βαθμοί ελευθερίας του MS_E εξαρτώνται από το πλήθος των μεταβλητών που συμμετέχουν στο μοντέλο και επομένως η τιμή του σφάλματος μεταβάλλεται. Ωστόσο, το επίπεδο σημαντικότητας που χρησιμοποιείται για την επιλογή ή απόρριψη μεταβλητών δεν είναι η πραγματική επειδή η μεταβλητή που επιλέγεται κάθε φορά είναι αυτή που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί το μερικό F-κριτήριο σε κάθε στάδιο. Μερικές φορές κρίνεται απαραίτητο να γίνεται μελέτη των μοντέλων που προκύπτουν σε κάθε βήμα επιλέγοντας διαφορετικές τιμές F_{in} και F_{out} και η διαδικασία να επαναλαμβάνεται έτσι ώστε να διαπιστώνεται εάν επηρεάζεται η επιλογή του μοντέλου από τις διαφορετικές τιμές F_{in} και F_{out} (Montgomery et al., 2003).

6.9.3. ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Η εμπρόσθια επιλογή είναι μια παραλλαγή της σταδιακής επιλογής και βασίζεται στην αρχή ότι οι υποψήφιοι παλινδρομητές προστίθενται στο μοντέλο σταδιακά κατά ένας. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν συμπεριληφθούν στο μοντέλο τόσοι παλινδρομητές ώστε να μην προκαλείται περαιτέρω σημαντική αύξηση του αθροίσματος τετραγώνων της παλινδρόμησης από την προσθήκη επιπλέον παλινδρομητών. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταβλητές προστίθενται μια κάθε φορά ώσπου η τιμή του μερικού F να ξεπεράσει την αντίστοιχη τιμή του κρίσιμου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

f_m. Η εμπρόσθια παλινδρόμηση αποτελεί απλοποίηση της σταδιακής επιλογής η οποία παραλείπει το F-κριτήριο για την απομάκρυνση μεταβλητών που προστέθηκαν στο μοντέλο σε προηγούμενα στάδια. Αυτή είναι μια αδυναμία της συγκεκριμένης μεθόδου επειδή δεν εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης ενός νέου παλινδρομητή, στο παρόν στάδιο, ως προς το αποτέλεσμα που προκύπτει από την προσθήκη των παλινδρομητών που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενα στάδια. Τέλος, είναι δυνατό η σταδιακή και η εμπρόσθια παλινδρόμηση να οδηγήσουν στα ίδια συμπεράσματα ως προς τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν τελικά στο μοντέλο παρόλο που η σταδιακή παλινδρόμηση δεν απέκλεισε καμία μεταβλητή (παλινδρομητή) (Montgomery et al., 2003).

6.9.4. ΟΠΙΣΘΟΔΡΟΜΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Η διαδικασία οπισθόδρομης απαλοιφής μεταβλητών ξεκινά να εφαρμόζεται στο μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τις K υποψήφιες μεταβλητές. Σταδιακά απορρίπτεται κάθε μεταβλητή, της οποίας το μερικό F-στατιστικό κριτήριο έχει την μικρότερη τιμή και για το οποίο ισχύει $F<F_{out}$. Έπειτα, ελέγχεται το μοντέλο με τις K-1 μεταβλητές και η διαδικασία τερματίζεται όταν καμία, από τις μεταβλητές που απέμειναν δεν μπορεί να απαλειφθεί (Montgomery et al., 2003).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Α. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κλιματικά δεδομένα της τριετίας 2007-2009. Παρουσιάζεται η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς όπως υπολογίστηκε από το εξατμισίμετρο τύπου Α και οι δόσεις άρδευσης που εφαρμόστηκαν μετά τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Μελετάται η εξοικονόμηση νερού άρδευσης με την εφαρμογή ελλειμματικής δόσης άρδευσης με το σύστημα της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης. Αξιολογείται η πιθανή εξοικονόμηση νερού άρδευσης με την χρήση πλήρως αυτοματοποιημένης επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

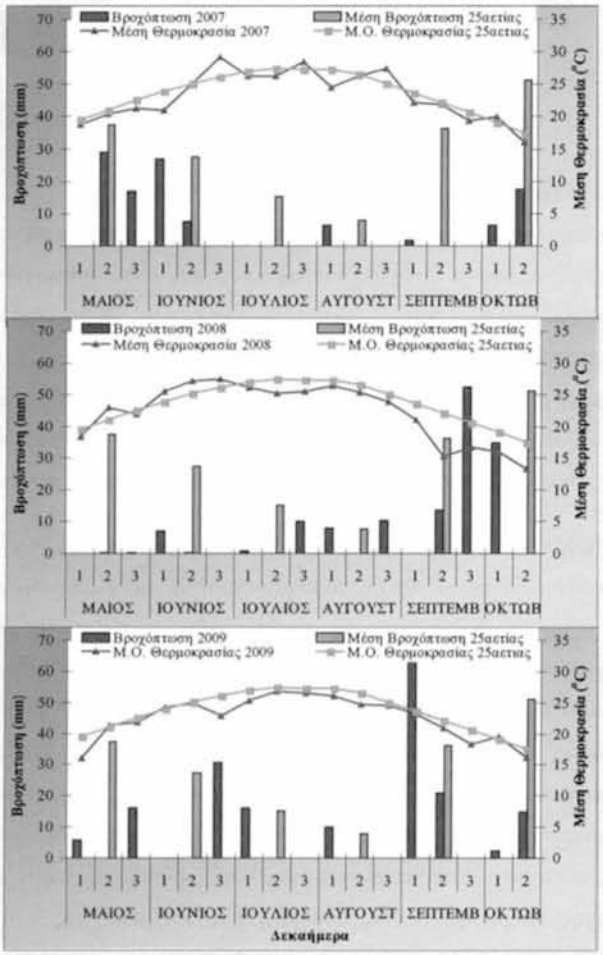
7.2. ΓΕΝΙΚΑ

Οι αρδεύσεις αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της γεωργικής πρακτικής σε περιοχές όπου οι εδαφοκλιματικές συνθήκες δεν ευνοούν την ικανοποιητική ανάπτυξη και παραγωγή των καλλιεργειών. Οι αρδεύσεις πραγματοποιούνται για να εφαρμοστούν οι απαιτούμενες ποσότητες νερού σε μια καλλιέργεια όταν οι βροχοπτώσεις, το αποθηκευμένο στο έδαφος νερό και το νερό που ανέρχεται με τριχοειδή φαινόμενα δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών της συγκεκριμένης καλλιέργειας σε νερό. Στην καθημερινή πρακτική της εφαρμογής των αρδεύσεων από τους παραγωγούς παρατηρούνται απώλειες αρδευτικού νερού κυρίως λόγω επιφανειακής απορροής, βαθιάς διήθησης και εξάτμισης ως αποτέλεσμα της υπεράρδευσης των καλλιεργειών και της μη έγκαιρης εφαρμογής των αρδεύσεων. Στην προσπάθεια εξορθολογισμού των αρδεύσεων και μείωσης των απωλειών νερού, σημαντικό ρόλο παίζει ο σωστός προγραμματισμός των αρδεύσεων αλλά και η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στο πεδίο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

7.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Από την επεξεργασία των δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής προέκυψε η Εικόνα 7.1 όπου απεικονίζονται η βροχόπτωση κάθε έτους σε σύγκριση με την μέση βροχόπτωση της τελευταίας 25αετίας καθώς και η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε σύγκριση με τη μέση θερμοκρασία της τελευταίας 25αετίας.



Εικόνα 7.1: Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2007-2009

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι γενικά η μέση θερμοκρασία της τριετίας κυμάνθηκε περίπου στο μέσο όρο της 25αετίας. Η καλλιεργητική περίοδος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2007 ήταν ελαφρώς θερμότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο καθώς η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας υπερέβη σε αρκετές περιπτώσεις την μέση τιμή της 25αετίας. Αντίθετα οι δύο άλλες καλλιεργητικές περίοδοι και ιδιαίτερα η περίοδος 2009 ήταν ψυχρότερες για το χρονικό διάστημα Ιουλίου-Οκτωβρίου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι την περίοδο σποράς του σόργου οι θερμοκρασίες ήταν ικανοποιητικές ιδιαίτερα την καλλιεργητική περίοδο 2008 όταν και παρατηρήθηκε άριστο φύτρωμα της καλλιέργειας. Η μέση ηλιακή ακτινοβολία που μετρήθηκε από το μετεωρολογικό σταθμό ήταν 33,2, 31,7 και 17,8MJ ανά ημέρα και ανά m^2 για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα.

Οι βροχοπτώσεις δεν παρουσίασαν την ίδια σταθερότητα με τις τιμές της θερμοκρασίας. Την καλλιεργητική περίοδο 2007 οι πολλές βροχοπτώσεις την περίοδο σποράς του σόργου δημιούργησαν προβλήματα στην φυτρωτικότητα του σπόρου λόγω σχηματισμού κρούστας στην επιφάνεια του εδάφους ενώ την περίοδο 2008 η σχεδόν απουσία βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες οδήγησαν σε άριστο φύτρωμα. Την περίοδο 2009 η μικρού ύψους αλλά μεγάλης έντασης βροχόπτωση προκάλεσε προβλήματα φυτρωτικότητας ανάλογα με της περιόδου 2007. Η κατανομή των βροχοπτώσεων το έτος 2008 και ειδικά την περίοδο από 20/7 έως 10/8 συνέβαλαν στην ικανοποιητική παραγωγή των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Αντίθετα, το έτος 2009 οι έντονες βροχοπτώσεις της περιόδου από 20/6 έως 10/7 ίσως επηρέασαν δυσμενώς τα φυτά των μεταχειρίσεων που δέχτηκαν ελλειμματική άρδευση γιατί τα κατέστησαν περισσότερο ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες που ακολούθησαν. Οι μεγάλου ύψους βροχοπτώσεις που συνέβησαν το πρώτο και δεύτερο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου είχαν ως αποτέλεσμα την ανάκαμψη των φυτών δίνοντας ικανοποιητική παραγωγή βιομάζας περίπου ένα μήνα αργότερα. Το συνολικό ύψος βροχόπτωσης για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους (14/5-20/10) ήταν 144, 226 και 174mm αντίστοιχα, από τα οποία τα 89, 47 και 73mm έπεσαν κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (14/5-15/9). Η μέση ατμοσφαιρική υγρασία ήταν 57,2%, 57,8% και 62,4% για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα.

7.3.1. ΦΥΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η παραγωγή και η ποιότητα των καλλιεργειών επηρεάζονται σημαντικά από την ανεπαρκή εφαρμογή του νερού άρδευσης και τον

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ακατάλληλο προγραμματισμό των αρδεύσεων. Οι απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ως αποτέλεσμα της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών και της ανάπτυξης του φυτού (Doorenbos and Pruitt, 1977). Για τον ακριβή προσδιορισμό των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό απαιτείται να είναι γνωστή η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c).

Για τον υπολογισμό της ET_c απαιτείται να είναι γνωστή η τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) και η τιμή του φυτικού συντελεστή της καλλιέργειας K_c. Η ET_o υπολογίστηκε με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου τύπου Α, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4. Ο φυτικός συντελεστής υπολογίζεται από το πηλίκο $K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$ και αντιπροσωπεύει το νερό που χρησιμοποιεί η καλλιέργεια. Οι (Doorenbos and Pruitt, 1977) προτείνουν ο φυτικός συντελεστής να υπολογίζεται με την χρήση λυσίμετρων για κάθε καλλιέργεια και για κάθε περιοχή χωριστά. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των φυτικών συντελεστών έγινε με βάση την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς από το εξατμισίμετρο τύπου Α και την μέθοδο των πειραματικών αγροτεμαχίων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τη σχέση

$$ET_s = I + P + \frac{EY_1 - EY_2}{100} \cdot \Phi.E.B. \cdot BP \qquad (7.1)$$

όπου ET_s είναι η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή (mm), I είναι η άρδευση (mm), P είναι η ωφέλιμη βροχόπτωση (mm), BP είναι το βάθος ριζοστρώματος (mm), Φ.Ε.Β. είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους και EY_1, EY_2 είναι η εδαφική υγρασία στην αρχή και το τέλος της βλαστικής περιόδου ως ποσοστό % ξηρού βάρους (Παπαζαφειρίου, 1997, 1999). Η μέθοδος εφαρμόστηκε για να προσδιοριστεί ο φυτικός συντελεστής κάθε $11^η$ ημέρα ενώ η εδαφική υγρασία εκφράζονταν ως ποσοστό % κ.ο. Επιλέχθηκε να γίνεται υπολογισμός του φυτικού συντελεστή κάθε $11^η$ ημέρα διότι η καλλιέργεια άλλαζε φυσιολογικό στάδιο κατά μέσο όρο κάθε $11^η$ ημέρα.

Η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας υπολογίστηκε με βάση τη βιβλιογραφία (Vanderlip and Reeves, 1972, Vanderlip, 1993, Allen et al. 1998) και τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια της έρευνας. Το αρχικό στάδιο, στο οποίο ο φυτικός συντελεστής είναι σταθερός αρχίζει από την ημερομηνία σποράς και ολοκληρώνεται όταν η καλλιέργεια φυτρώσει πλήρως και καλύψει την

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

επιφάνεια του εδάφους σε ποσοστό 10%. Το δεύτερο στάδιο, στάδιο ταχείας ανάπτυξης του φυτού, ξεκινά όταν η καλλιέργεια καλύψει το 10% της επιφάνειας του εδάφους και ολοκληρώνεται όταν η κάλυψη του εδάφους φτάσει το 70%. Το τρίτο στάδιο ξεκινά από το τέλος του δευτέρου και ολοκληρώνεται με την ολοκλήρωση του σχηματισμού του σπόρου. Από το χρονικό αυτό σημείο αρχίζει το τέταρτο στάδιο το οποίο διαρκεί έως τη γήρανση της καλλιέργειας οπότε ο φυτικός συντελεστής έχει την ελάχιστη τιμή. Καθένα από τα στάδια αυτά χαρακτηρίζεται από διαφορετικό φυτικό συντελεστή. Έτσι, για το πρώτο και το τρίτο στάδιο οι φυτικοί συντελεστές είναι σταθεροί ενώ κατά τη διάρκεια του δεύτερου και τετάρτου σταδίου ο φυτικός συντελεστής υπολογίζεται με παρεμβολή στις αντίστοιχες τιμές του $1^{ου}$, $3^{ου}$ και τελικού σταδίου (Παπαζαφειρίου, 1997, 1999). Στον παρακάτω Πίνακα 7.1 αναφέρονται οι αλλαγές των βασικών σταδίων της καλλιέργειας και η διάρκεια του κάθε σταδίου.

Πίνακας 7.1: Ημέρα του έτους κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η σπορά και μετάβαση της καλλιέργειας από στάδιο σε στάδιο.

ΕΤΟΣ	$H_{\Sigma\pi}$	H_2	H_3	H_4	$H_{\Omega\rho}$
2007	134	161	196	242	277
2008	135	158	192	235	270
2009	134	162	197	243	278
Διάρκεια Σταδίου		25	35	45	35

$H_{\Sigma\pi}$: ημέρα σποράς
H_2: ημέρα έναρξης $2^{ου}$ σταδίου
H_3: ημέρα έναρξης $3^{ου}$ σταδίου
H_4: ημέρα έναρξης $4^{ου}$ σταδίου
H_5: ημέρα ολοκλήρωσης ωρίμανσης

Για τον υπολογισμό των δόσεων άρδευσης χρησιμοποιήθηκαν οι τυποποιημένοι φυτικοί συντελεστές όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την καλλιέργεια του φυτού σόργου σε συνθήκες Μεσογειακών κλιματικών συνθηκών και για ύψος καλλιέργειας που φτάνει τα 2-4m (Allen et al., 1998). Σημειώνεται ότι η τιμή του τελικού φυτικού συντελεστή αναφέρεται σε καλλιέργεια η οποία αφήνεται να ξεραθεί στον αγρό (υγρασία σπόρου 18% κατά βάρος χλωρής μάζας περίπου). Σύμφωνα με τους Allen et al., (1998) για την ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου της καλλιέργειας απαιτούνται 130 ημέρες για την περιοχή της Μεσογείου. Ωστόσο η καλλιεργητική πρακτική έδειξε ότι η καλλιέργεια απαιτεί 140 ημέρες για να ολοκληρώσει το βιολογικό κύκλο της στις συνθήκες της περιοχή Βελεστίνου. Στον παρακάτω Πίνακα 7.2 φαίνονται οι τυποποιημένοι φυτικοί συντελεστές για κάθε στάδιο, οι αντίστοιχες μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε μεταχείριση και ο μέσος όρος της τριετίας 2007-2009.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πίνακας 7.2: Τυποποιημένοι και υπολογισμένοι φυτικοί συντελεστές για κάθε στάδιο ανάπτυξης και για κάθε μεταχείριση.

ΕΤΟΣ		A100	E50	E70	E100	Y50	Y70	Y100
2007	Kc_{ini}		0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
	Kc_{mid}		0,81	1,00	1,18	0,77	0,99	1,20
	Kc_{end}		0,62	0,59	0,69	0,51	0,46	0,65
2008	Kc_{ini}	0,41	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Kc_{mid}	1,12	0,70	0,90	1,09	0,69	0,85	1,11
	Kc_{end}	0,70	0,52	0,58	0,64	0,54	0,56	0,62
2009	Kc_{ini}	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
	Kc_{mid}	1,17	0,84	1,03	1,11	0,80	0,95	1,18
	Kc_{end}	0,82	0,52	0,54	0,53	0,54	0,52	0,59
Μέσος Όρος	**Kc_{ini}**	**0,45**	**0,43**	**0,43**	**0,43**	**0,43**	**0,43**	**0,43**
	Kc_{mid}	**1,15**	**0,78**	**0,98**	**1,13**	**0,75**	**0,93**	**1,16**
	Kc_{end}	**0,76**	**0,55**	**0,57**	**0,62**	**0,53**	**0,51**	**0,62**
Τυποποιημένοι Kc	$Kc_{ini} = 0,30$		$Kc_{mid} = 1,20$		$Kc_{end} = 0,60$			

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι απαιτείται προσδιορισμός των φυτικών συντελεστών για κάθε περιοχή. Αξιοσημείωτες είναι οι παρατηρήσεις ότι:

- Στη μεταχείριση E100 οι μέσες τιμές των Kc_{ini}, Kc_{mid} και Kc_{end} διέφεραν κατά 30,2%, 5,8% και 3,2% σε σύγκριση με τις τιμές που προτείνονται από τους Allen et al. (1998).
- Στη μεταχείριση Y100 οι μέσες τιμές των Kc_{ini}, Kc_{mid} και Kc_{end} διέφεραν κατά 30,2%, 3,3% και 3,2% σε σύγκριση με τις τιμές που προτείνονται από τους Allen et al. (1998).
- Στη μεταχείριση A100 οι μέσες τιμές των Kc_{ini}, Kc_{mid} και Kc_{end} διέφεραν κατά 33,3%, 4,2% και 21,1% σε σύγκριση με τις τιμές που προτείνονται από τους Allen et al. (1998). Η τιμή Kc_{end} που παρατηρείται στη συγκεκριμένη μεταχείριση είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές στις μεταχειρίσεις E100 και Y100. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στις μεγαλύτερες δόσεις άρδευσης που εφαρμόζονταν κατά το τελευταίο στάδιο της καλλιέργειας για να φτάσει η εδαφική υγρασία στην υδατοικανότητα ενώ η καλλιέργεια πλέον βρίσκεται σε στάδιο γήρανσης και επομένως δεν εκμεταλλεύεται το επιπλέον νερό.
- Στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά οι τιμές των φυτικών συντελεστών ήταν μικρότερες, γεγονός που δικαιολογείται από την μικρότερη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις αυτές. Επιπροσθέτως οι μεταχειρίσεις Y50 και Y70 παρουσιάζουν μικρότερους φυτικούς συντελεστές από τις μεταχειρίσεις E50 και E70 αντίστοιχα, γεγονός

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

που δικαιολογείται από την μικρότερη εξατμισοδιαπνοή και επιβεβαιώνει όσους υποστηρίζουν ότι με την υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζεται αποδοτικότερα το αρδευτικό νερό.

7.3.2. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς μετρήθηκε με εξατμισίμετρο τύπου Α. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι η συνολική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου ήταν 686,4, 662,1 και 531,3mm για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα. Οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για όλη την καλλιεργητική περίοδο ήταν 773,9, 720,1 και 651,0 για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας για όλη την καλλιεργητική περίοδο, όπως διαμορφώθηκε από τις κλιματικές συνθήκες και την συμβολή του εδαφικού νερού, και υπολογίστηκε από την εξίσωση 7.1 ήταν 753,2, 784,3 και 659,3 αντίστοιχα για τα έτη 2007, 2008 και 2009. Στον παρακάτω Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας για κάθε μεταχείριση και σε καθένα από τα τέσσερα βλαστικά στάδια.

Πίνακας 7.3: Τιμές εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας όπως υπολογίστηκαν από την εξίσωση 7.1 για κάθε μεταχείριση και βλαστικό στάδιο ανάπτυξης την τριετία 2007-2009.

ΕΤΟΣ	Βλαστικό Στάδιο	A100	E50	Y50	E70	Y70	E100	Y100
2007	1°	63,5	67,4	67,4	67,4	67,4	67,4	67,4
	2°	194,3	170,8	148,7	186,3	162,0	234,8	209,0
	3°	378,2	247,3	226,3	310,5	291,4	393,6	373,4
	4°	30,5	27,1	20,4	41,2	35,0	57,4	50,2
	Σύνολο	**666,5**	**512,6**	**462,8**	**605,4**	**555,8**	**753,2**	**700,0**
2008	1°	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
	2°	108,5	153,0	139,0	168,8	162,2	212,4	196,2
	3°	325,0	238,6	213,8	299,6	279,4	367,4	352,4
	4°	165,2	94,2	86,4	130,6	111,8	179,2	164,0
	Σύνολο	**624,0**	**511,1**	**464,5**	**624,3**	**578,7**	**784,3**	**737,9**
2009	1°	24,3	46,8	43,8	33,6	36,0	34,8	40,8
	2°	175,5	161,6	146,3	185,7	161,5	217,0	189,3
	3°	281,0	209,4	189,0	258,2	233,2	293,4	269,3
	4°	85,3	35,7	31,8	57,2	45,0	114,1	99,7
	Σύνολο	**566,1**	**453,5**	**410,9**	**534,7**	**475,7**	**659,3**	**599,1**

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας παρουσίασε διαφορές μεταξύ των ετών αλλά και μεταξύ των μεθόδων άρδευσης. Οι διαφορές μεταξύ των ετών ήταν αποτέλεσμα κυρίως των κλιματικών συνθηκών που επικράτησαν σε κάθε έτος της έρευνας. Η διαφορά στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας μεταξύ της επιφανειακής και της υπόγειας στάγδην άρδευσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κυμάνθηκε σε ποσοστό 8,5% κατά μέσο όρο. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας στη μεταχείριση Α100 διέφερε σε ποσοστό 20,4% και 14,1% τα έτη 2008 και 2009 αντίστοιχα από την αντίστοιχη που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Ε100.

Διαφοροποίηση στην εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας παρατηρήθηκε σε όλα τα βλαστικά στάδια. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στο 3^{ο} βλαστικό στάδιο, όταν η καλλιέργεια ήταν σε πλήρη ανάπτυξη, και κυμάνθηκε από 8,5% έως 24,7% στις διάφορες μεταχειρίσεις. Μικρότερη αλλά σημαντική ήταν η διαφοροποίηση στο 2^{ο} βλαστικό στάδιο και κυμάνθηκε μεταξύ 4,1% και 9,7%.

7.4. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

7.4.1. ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ

Ο υπολογισμός των δόσεων άρδευσης έγινε με την χρήση εξατμισίμετρου τύπου Α για τις μεταχειρίσεις Ε100, Υ100, Ε70, Υ70, Ε50 και Υ50 και με αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους για τη μεταχείριση Α100. Το εύρος άρδευσης προαποφασίστηκε να είναι 2 ημέρες. Ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε με γνώμονα την εξατμισοδιαπνοή που υπολογίζονταν με βάση το εξατμισίμετρο τύπου Α. Έτσι στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν πλήρη άρδευση (Ε100 και Υ100) όσο νερό απομακρύνονταν με βάση το εξατμισίμετρο αναπληρώνονταν με την άρδευση ενώ στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά η δόση άρδευσης αποτελούσε ποσοστό της αντίστοιχης δόσης πλήρους άρδευσης. Στη μεταχείριση Α100 ο υπολογισμός της δόσης άρδευσης γινόταν με βάση την εξάντληση της εδαφικής υγρασίας όπως αυτή καταγράφονταν από τον αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας. Η έναρξη του προγράμματος στάγδην άρδευσης γινόταν την περίοδο μεταξύ 25/6 και 3/7 ανάλογα με την πορεία ανάπτυξης του φυτού έτσι ώστε να έχει διαμορφωθεί πλήρως το ριζικό σύστημα και το φυτό να καθίσταται ικανό να απορροφά το νερό που εφαρμόζεται με την υπόγεια στάγδην άρδευση. Υπενθυμίζεται ότι οι αγωγοί εφαρμογής στην υπόγεια στάγδην άρδευση ήταν τοποθετημένοι σε βάθος 0,45m. Ο συνολικός αριθμός των αρδεύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης ήταν 21, 29 και 26 για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα. Στον παρακάτω Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν σε κάθε μεταχείριση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πίνακας 7.4: Συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που χορηγήθηκε σε κάθε μεταχείριση και κάθε καλλιεργητική κάθε καλλιεργητική περίοδο.

ΕΤΟΣ	A100	E50	Y50	E70	Y70	E100	Y100
2007	607,4	332,6	339,8	443,4	447,8	606,2	613,0
2008	516,0	288,6	293,0	407,8	407,2	583,8	569,4
2009	404,6	248,2	252,4	326,4	319,6	442,0	435,8

Κατά την περίοδο από τη σπορά μέχρι και την έναρξη του προγράμματος στάγδην άρδευσης οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό καλύπτονταν με άρδευση με τη μέθοδο του καταιονισμού. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 6, 7, 9 αρδεύσεις με καταιονισμό για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα. Η συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε στις μεταχειρίσεις E100, Y100, E70, Y70, E50 και Y50 με τη μέθοδο του καταιονισμού ήταν 63, 111 και 90mm για τα έτη 2007, 2008 και 2009 αντίστοιχα. Στη μεταχείριση A100 η συνολική ποσότητα άρδευσης που εφαρμόστηκε με καταιονισμό ήταν 53,5 και 90mm για τα έτη 2008 και 2009 αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι το έτος 2007 στη μεταχείριση A100 η δόση άρδευσης υπολογίζονταν με την χρήση του εξατμισίμετρο τύπου Α ενώ ο αισθητήρας χρησιμοποιούνταν μόνο για καταγραφή της εδαφικής υγρασίας και επομένως η συνολική ποσότητα άρδευσης με καταιονισμό ήταν ίδια με αυτή που εφαρμόστηκε στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις (63mm).

7.4.2. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ-ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού είναι το κρίσιμο μέγεθος που καθορίζει και την εξοικονόμηση νερού άρδευσης. Ο Monteith, (1993) ορίζει την αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) ως το πηλίκο της συνολικής ξηρής βιομάζας δια το συνολικό νερό που εφαρμόστηκε ως άρδευση, βροχόπτωση και συμβολή του αποθηκευμένου εδαφικού νερού ενώ οι Phene et al., (1988) ορίζουν την WUE ως την αναλογία ξηρής βιομάζας ανά μονάδα νερού που εξατμισοδιαπνέεται από μια καλλιέργεια που δεν υφίσταται καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού. Οι Howell et al., (1990) διατύπωσαν τον όρο αποδοτικότητα αρδευτικού νερού (IWUE) ο οποίος αποτελεί το πηλίκο της συνολικής παραγόμενης ξηρής βιομάζας δια το συνολικό νερό άρδευσης. Στον επόμενο Πίνακα 7.5 παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε σε κάθε μεταχείριση, η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού καθώς και η μέση παραγωγή ξηρής βιομάζας (για την οποία γίνεται εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Πίνακας 7.5: Αποδοτικότητα χρήσης νερού την τριετία 2007-2009

	ΕΤΟΣ	A100	E50	Y50	E70	Y70	E100	Y100
Ποσότητα Νερού		670,4	395,6	402,8	506,4	510,8	669,2	676,0
Απόδοση Ξηρής Βιομάζας	**2007**	3478	2718	3259	3038	3357	3553	4287
IWUE (Kg/mm)		**5,19**	**6,87**	**8,09**	**6,00**	**6,57**	**5,31**	**6,34**
Ποσότητα Νερού		569,5	399,6	404,0	518,8	518,2	684,8	677,4
Απόδοση Ξηρής Βιομάζας	**2008**	3937	2318	3083	3218	3960	4185	4410
IWUE (Kg/mm)		**6,91**	**5,80**	**7,63**	**6,20**	**7,64**	**6,11**	**6,51**
Ποσότητα Νερού		494,6	338,2	342,4	416,4	409,6	532,0	525,8
Απόδοση Ξηρής Βιομάζας	**2009**	4000	2375	2925	3025	3750	3975	4200
IWUE (Kg/mm)		**8,09**	**7,02**	**8,54**	**7,27**	**9,16**	**7,47**	**7,99**
Μέσος Όρος IWUE		**6,73**	**6,56**	**8,09**	**6,49**	**7,79**	**6,30**	**6,95**

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού είναι μεγαλύτερη στην υπόγεια στάγδην άρδευση σε σύγκριση με την επιφανειακή. Αναλυτικότερα, παράγεται 18,7%, 16,7% και 9,4% περισσότερη ξηρή βιομάζα στις μεταχειρίσεις Y50, Y70 και Y100 αντίστοιχα, για κάθε mm νερού άρδευσης που εφαρμόζεται. Με άλλα λόγια για να παραχθεί ίση ποσότητα ξηρής βιομάζας από τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις E50, E70 και E100 απαιτείται να καταναλωθεί 18,7%, 16,7% και 9,4% περισσότερο νερό άρδευσης (μέσες τιμές). Επομένως, εφαρμογή της δόσης άρδευσης με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 14,9% κατά μέσο όρο στο σύνολο των μεταχειρίσεων (εκτός της A100). Ειδικά στην περίπτωση της μεταχείρισης A100 (πλήρως αυτοματοποιημένη), η σύγκριση της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού με την αντίστοιχη της μεταχείρισης E100 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εξοικονόμηση νερού άρδευσης, κατά μέσο όρο τη διετία 2008-2009, φτάνει το 7,6%. Εάν η σύγκριση γίνει μεταξύ των τελικών ποσοτήτων νερού που εφαρμόστηκαν σε κάθε μεταχείριση τότε προκύπτει ότι η μέση εξοικονόμηση νερού τη διετία 2008-2009 φτάνει το 10,1%.

7.4.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ- ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΟΡΓΟΥ

Κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως η εδαφική υγρασία αυξάνονταν προοδευτικά κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Αντίθετα στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά η εδαφική υγρασία μειώνονταν προοδευτικά. Μεγαλύτερη ήταν η μείωση στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν τη μικρότερη δόση άρδευσης.

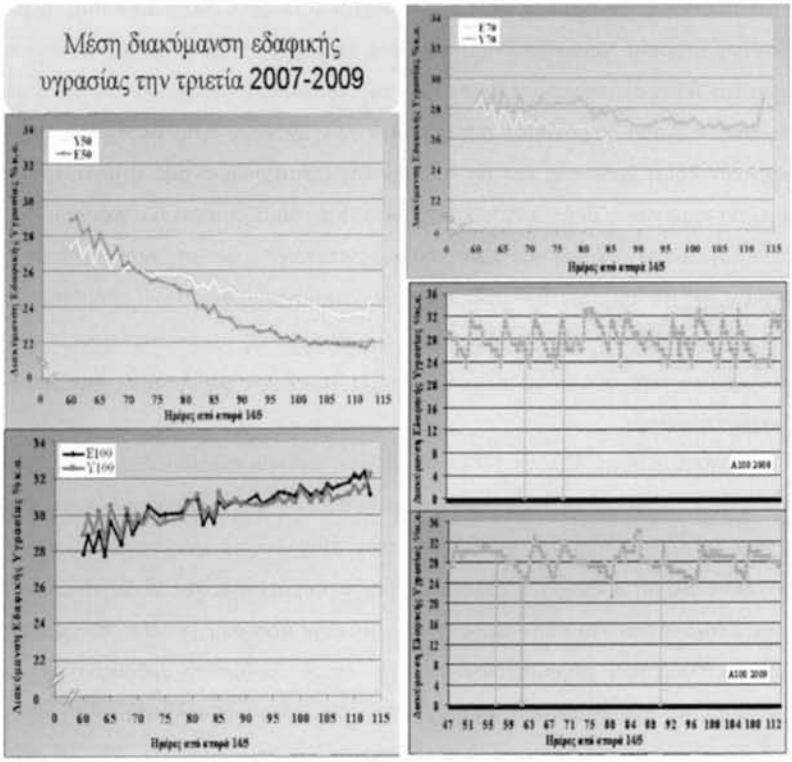
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Σε όλες τις μεταχειρίσεις η εδαφική υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ του σημείου μόνιμης μάρανσης (18,5%κ.ο.) και της υδατοικανότητας (32,68%κ.ο). Αναλυτικότερα, στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης η μέση εδαφική υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ 28% και 32%κ.ο. Στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 70% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής η μέση εδαφική υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ 24% και 29%κ.ο. Στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 50% της εξατμισοδιαπνοής η μέση εδαφική υγρασία κυμάνθηκε μεταξύ 22% και 29%κ.ο. Υπενθυμίζεται ότι η εδαφική υγρασία όταν άρχιζε η εφαρμογή του προγράμματος στάγδην άρδευσης ήταν περίπου στο 27%κ.ο. ως αποτέλεσμα των αρδεύσεων με καταιονισμό για την εξυπηρέτηση του φυτρώματος και της πρώτης ανάπτυξης του φυτού έως το χρονικό σημείο που η καλλιέργεια είχε αναπτύξει ριζικό σύστημα ικανό να αξιοποιήσει την υπόγεια στάγδην άρδευση.

Στην παρακάτω Εικόνα 7.2 φαίνεται ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση διατηρεί την εδαφική υγρασία σε υψηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη επιφανειακή στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Παραδόξως, στις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν πλήρη άρδευση η εδαφική υγρασία κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα τόσο στην υπόγεια όσο και στην επιφανειακή στάγδην άρδευση γεγονός που σημαίνει πως η καλλιέργεια χρησιμοποιούσε με πιο έντονο ρυθμό το αρδευτικό νερό σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις διατηρώντας σταθερή την εδαφική υγρασία ενώ στις ελλειμματικά και υπόγεια αρδευόμενες μεταχειρίσεις οι ρυθμοί αξιοποίησης του νερού ήταν μικρότεροι αλλά τα χαρακτηριστικά του εδάφους επέτρεπαν την αποθήκευση ποσοτήτων νερού. Από την ίδια εικόνα φαίνεται ότι δεν σημειώθηκε βαθιά διήθηση κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι στη μεταχείριση Ε50 η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε πάνω από το 24%κ.ο. έως την 85η (10/8) ημέρα από τη σπορά γεγονός που σημαίνει ότι η καλλιέργεια δεν καταπονήθηκε σε μέγιστο βαθμό κατά την περίοδο της άνθησης οπότε και το σόργο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην έλλειψη νερού. Η παρατήρηση αυτή εξηγεί ως ένα βαθμό την ικανοποιητική ανάπτυξη και παραγωγή της συγκεκριμένης μεταχείρισης. Ειδικά για τη μεταχείριση Α100 η διακύμανση της μέσης εδαφικής υγρασίας ήταν σταθερή και κυμάνθηκε μεταξύ 24% και 32%κ.ο. που ήταν και τα όρια λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

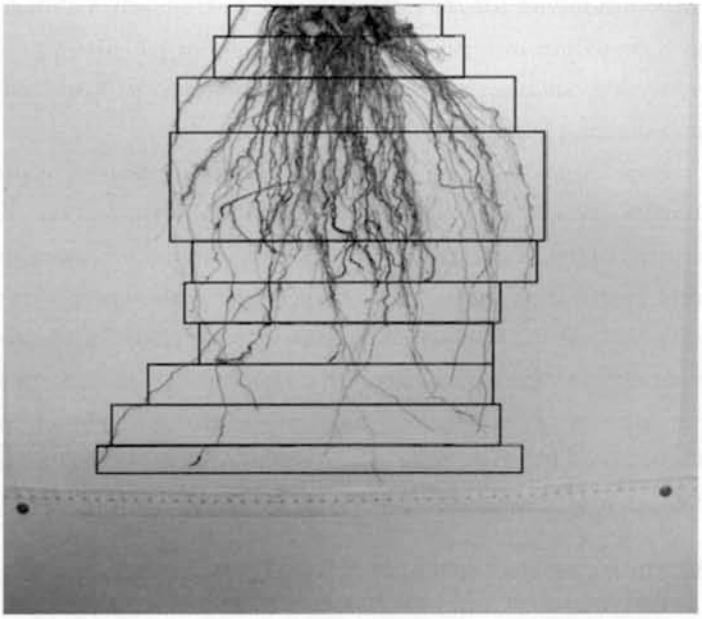
άρδευσης. Στην αντίστοιχη εικόνα φαίνονται οι μέσες τιμές της διετίας 2008-2009 όπως καταγράφονταν από το ειδικό καταγραφικό (data logger).



Εικόνα 7.2: Διακύμανση των μέσων τιμών της εδαφικής υγρασίας την τριετία 2007-2009

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2009 υπολογίστηκε το εμβαδόν το εμβαδόν που καλύπτει το ριζικό σύστημα του φυτού. Η εμβαδομέτρηση του ριζικού συστήματος έγινε σε τυχαίο δείγμα ρίζας. Για την απομόνωση της ρίζας από το φυτό που επελέγη πραγματοποιήθηκε εκσκαφή φρεατίου σε βάθος 60cm κυκλικά και σε ακτίνα 50cm από το στέλεχος του φυτού. Στη συνέχεια η ρίζα πλύθηκε με νερό υπό πίεση περίπου 2atm για να διαχωριστεί από το χώμα και αφέθηκε να στεγνώσει για 48 ώρες. Έπειτα αποτυπώθηκε σε χαρτί μιλιμετρέ υπό μορφή ορθογωνίων παραλληλογράμμων και εμβαδομετρήθηκε. Από την εμβαδομέτρηση προέκυψε ότι η συγκεκριμένη ρίζα καλύπτει επιφάνεια 466cm^2. Το μέγιστο μήκος των ριζικών τριχιδίων έφτανε τα 50cm ενώ το μέγιστο πλάτος έφτανε τα 35cm.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 7.3: Εμβαδομέτρηση ρίζας σόργου

Από την παραπάνω Εικόνα 7.3 φαίνεται ότι το ριζικό σύστημα δεν επηρεάστηκε από τη συχνότητα των αρδεύσεων. Η ανάπτυξή του έφτασε έως το βάθος των 50cm τουλάχιστο, δεδομένου ότι κατά την εξαγωγή από το έδαφος κάποια ριζικά τριχίδια αποκόπηκαν. Επομένως το φυτό ανέπτυξε ριζικό σύστημα τουλάχιστο έως το βάθος του υπόγειου αγωγού εφαρμογής.

7.5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

7.5.1. ΑΡΔΕΥΣΗ

Η ποσότητα νερού άρδευσης που απαιτείται για μια κανονική παραγωγή καρποδοτικού σόργου κυμαίνονται μεταξύ 450 και 560mm ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν (Rogers and Alam, 1998). Οι ErteK et al., (2006) αναφέρουν ότι για ετήσια εξατμισοδιαπνοή 689,5mm και ωφέλιμη βροχόπτωση 11,3mm απαιτούνται 320-509mm για οικονομική παραγωγή ανάλογα με την δόση άρδευσης που εφαρμόζεται. Οι Schneider and Howell, (1999) αναφέρουν ότι για πλήρη κάλυψη των αναγκών του σόργου σε νερό με καταιονισμό απαιτούνται 398-585mm νερού ανάλογα με τη δόση άρδευσης. Οι Faci and Fereres, (1980) αναφέρουν ότι για πλήρη κάλυψη των αναγκών του καρποδοτικού σόργου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σε νερό απαιτούνται 630mm νερού όταν η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή ήταν 8 και 651mm αντίστοιχα. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι για κάλυψη του 50% των αναγκών της καλλιέργειας απαιτούνται 330mm όταν η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή ήταν 27 και 476mm αντίστοιχα.

Στην Ελλάδα οι απαιτήσεις σε νερό της καλλιέργειας του σόργου έχουν μελετηθεί τόσο από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής όσο και από άλλους ερευνητές. Οι Dercas and Liakatas, (2006) αναφέρουν ότι οι απαιτήσεις του γλυκού σόργου σε νερό κυμαίνονται μεταξύ 421 και 657mm ανάλογα με τη δόση άρδευσης που εφαρμόζεται. Οι Sakellariou-Makrantonaki et al., (2005e) αναφέρουν ότι για την κάλυψη του 100% των απαιτήσεων του σόργου σε νερό εφαρμόστηκαν 580mm με τη μέθοδο του καταιονισμού. Οι Sakellariou et al., (2007a) αναφέρουν ότι για την κάλυψη του 100% των απαιτήσεων του γλυκού σόργου σε νερό εφαρμόστηκαν 659mm με τη μέθοδο της επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

7.5.2. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Από τη μελέτη της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) προκύπτει ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Οι Phene et al., (1987) αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού αυξάνεται με την υπόγεια στάγδην άρδευση λόγω της μειωμένης εξάτμισης και της αυξημένης διαπνοής, η οποία μειώνει την θερμοκρασία του φύλλου αυξάνοντας το άνοιγμα των στομάτων και την φωτοσύνθεση. Μεταξύ των μεταχειρίσεων, η αποδοτικότητα χρήσης νερού ήταν μεγαλύτερη στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Οι Dercas and Liakatas, (2006) αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού αυξάνεται σε φυτά που αρδεύονται ελλειμματικά λόγω αποδοτικότερης χρήσης του διαθέσιμου νερού. Οι Sakellariou-Makrantonaki et al., (2007a) αναφέρουν ανάλογα αποτελέσματα σε γλυκό σόργο. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 η μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ70. Οι Singh and Singh, (1995) αναφέρουν ότι σε καλλιέργεια σόργου η αποδοτικότητα χρήσης νερού είναι μεγαλύτερη σε μετρίως ελλειμματική άρδευση.

Από τη συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε με τις μεθόδους της επιφανειακής και της υπόγειας στάγδην άρδευσης εξοικονομείται νερό. Η μέση εξοικονόμηση νερού που υπολογίστηκε με την υπόγεια στάγδην

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

άρδευση είναι μόλις 1,0%. Σημειώνεται, ότι οι διάφορες μελέτες της υπόγειας στάγδην άρδευσης έδειξαν ότι σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε σημαντική εξοικονόμηση νερού ενώ σε άλλες η μείωση ήταν ελάχιστη (Camp et al., 1998). Ωστόσο, μελετώντας την αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού διαπιστώνεται ότι η μέση εξοικονόμηση νερού φτάνει το 14,9%. Ειδικά για την περίπτωση της αυτοματοποιημένης άρδευσης (A100), η οποία εφαρμόζεται τις καλλιεργητικές περιόδους 2008-2009, η εξοικονόμηση νερού φτάνει το 7,6%, σε σύγκριση με τη μεταχείριση E100, όταν ο υπολογισμός γίνεται με βάση την αποδοτικότητα χρήσης νερού και το 10,1% όταν ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη ποσότητα αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης.

7.5.3. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Από τη μελέτη των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας φαίνεται ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση διατηρεί την εδαφική υγρασία σε υψηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη επιφανειακή στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν διαπιστώσει οι Neibling and Gallian, (1997), Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., (2000), Sakellariou-Makrantonaki et al., (2001, 2002b). Δεν παρατηρήθηκε βαθιά διήθηση κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας ενώ στη μεταχείριση E50 η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε πάνω από το 24%κ.ο. έως την 85η (10/8) ημέρα από τη σπορά γεγονός που σημαίνει ότι η καλλιέργεια δεν καταπονήθηκε σε μέγιστο βαθμό κατά την περίοδο της άνθησης οπότε και το σόργο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην έλλειψη νερού. Η παρατήρηση αυτή εξηγεί ως ένα βαθμό την ικανοποιητική ανάπτυξη και παραγωγή της συγκεκριμένης μεταχείρισης. Ειδικά για τη μεταχείριση A100 η διακύμανση της μέσης εδαφικής υγρασίας ήταν σταθερή και κυμάνθηκε μεταξύ 24% και 32%κ.ο. που ήταν και τα όρια λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος άρδευσης.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της εμβαδομέτρησης φαίνεται ότι το ριζικό σύστημα δεν επηρεάστηκε από τη συχνότητα των αρδεύσεων. Η ανάπτυξή του έφτασε έως το βάθος των 50cm τουλάχιστο δεδομένου ότι κατά την εξαγωγή από το έδαφος κάποια ριζικά τριχίδια αποκόπηκαν. Επομένως το φυτό ανέπτυξε ριζικό σύστημα τουλάχιστο έως το βάθος του υπόγειου αγωγού εφαρμογής ενώ η μέγιστη πυκνότητα ριζών παρατηρήθηκε στα 30cm. Οι Phene et al., (1991) αναφέρουν ότι η συχνή άρδευση με τη μέθοδο της επιφανειακής και υπόγειας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

στάγδην άρδευσης δεν περιόρισαν την ανάπτυξη και το μήκος του ριζικού συστήματος σε καλλιέργεια καλαμποκιού. Οι Turner and Butch, (1982) και Phene et al., (1991) αναφέρουν μέγιστη πυκνότητα ριζών στα πρώτα 30cm βάθους εδάφους. Από την εμβαδομέτρηση προέκυψε ότι η συγκεκριμένη ρίζα καλύπτει επιφάνεια 932cm^2. Το μέγιστο μήκος των ριζικών τριχιδίων έφτανε τα 50cm ενώ το μέγιστο πλάτος έφτανε τα 35cm.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Β. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI)

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται η επίδραση της μεθόδου στάγδην άρδευσης (επιφανειακής και υπόγειας) και της δόσης άρδευσης στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας του φυτού. Γίνεται αξιολόγηση μιας νέας άμεσης μεθόδου μέτρησης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με μια έμμεση μέθοδο που εφαρμόζεται για αρκετά χρόνια από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής.

8.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) αποτελεί μια σημαντική ποσότητα με την οποία ελέγχονται οι φυσικές και βιολογικές διεργασίες της φυλλικής επιφάνειας του φύλλου. Ως δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) ορίζεται η συνολική επιφάνεια της μιας πλευράς του φυλλικού ιστού ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους (Watson, 1947).

Ο δείκτης LAI περιγράφει το μικροκλίμα μεταξύ της κόμης μιας καλλιέργειας αλλά και κάτω από την αυτή. Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα του βιογεοχημικού κύκλου ενός οικοσυστήματος διότι καθορίζει και ελέγχει την απορρόφηση νερού, την πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας και την ανταλλαγή υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα. Κάθε αλλαγή στην φυλλική επιφάνεια που προκαλείται από διάφορους παράγοντες (παγετό, καταιγίδα, χαλαζόπτωση, έλλειψη νερού, καλλιεργητικοί χειρισμοί) συνεπάγεται μεταβολή στην κατάσταση και παραγωγικότητα του φυτού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ οικοσυστήματος και ατμόσφαιρας είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας. Η χωρική παραλλακτικότητα περιλαμβάνει την οριζόντια και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κατακόρυφη διάταξη των φύλλων μιας καλλιέργειας ενώ η χρονική παραλλακτικότητα περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση της δομής του φυτού, της κατανομής στον αγρό και της ετερογένειας τόσο μέσα στην ίδια καλλιεργητική περίοδο όσο και μεταξύ των ετών (Bréda, 2003). Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας είναι μεγάλης σημασίας για πολλούς τομείς της Γεωπονικής επιστήμης και της γεωργικής πρακτικής γιατί αναφέρεται στην απορρόφηση φωτός από το φυτό, στην ανάπτυξη του φυτού (Pearce et al., 1965) στον έλεγχο ζιζανίων, στον ανταγωνισμό μεταξύ ζιζανίων και φυτών της καλλιέργειας, στη χρήση του νερού από τα φυτά της καλλιέργειας αλλά και στην διάβρωση των εδαφών (Wilhelm et al., 2000).

8.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ LAI

8.2.1. ΑΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι άμεσες ή ημιάμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν μέτρηση της επιφάνειας του φύλλου είτε με ειδικό μέτρο είτε ή με υπολογισμό της σχέσης του μεγέθους της επιφάνειας με ένα συντελεστή σκίασης (Bréda, 2003). Οι άμεσες μέθοδοι είναι οι μόνες που δίνουν την πραγματική τιμή του LAI γιατί υπολογίζουν το σχήμα, το μέγεθος και τον αριθμό των φύλλων. Επιπλέον, αποτελούν το σημείο αναφοράς για την βαθμονόμηση των έμμεσων μεθόδων.

Η μέτρηση της φυλλικής επιφάνειας πρέπει να γίνεται άμεσα αν και η άμεση μέτρηση είναι χρονοβόρα και καταστροφική (Wilhelm et al., 2000). Οι διάφοροι ερευνητές για να μετρήσουν την φυλλική επιφάνεια έκοβαν έναν αριθμό φυτών, διαχώριζαν τα διάφορα μέρη του φυτού, μετρούσαν την επιφάνεια των φύλλων και υπολόγιζαν το μέσο όρο της φυλλικής επιφάνειας ανά φυτό. Στη συνέχεια το γινόμενο του μέσου όρου της φυλλικής επιφάνειας ανά φυτό επί τον αριθμό των φυτών έδινε το LAI. Εναλλακτικά, το LAI μπορεί να μετρηθεί χωρίς να καταστραφούν φυτά με μια διαδικασία προσδιορισμού της επιφάνειας των φύλλων από την μέτρηση του μήκους και του πλάτους των φύλλων (Hopkins, 1939, Lal and Subba Rao, 1950, van Arkel, 1978).

8.2.2. ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι έμμεσες μέθοδοι υπολογίζουν την τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας από την διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα στην φυλλική επιφάνεια εφαρμόζοντας της θεωρία της μεταφοράς ακτινοβολίας (Bréda, 2003). Για την εκτίμηση του LAI μιας καλλιέργειας χρησιμοποιείται η αναλογία μεταξύ άμεσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και έμμεσης απορροφόμενης ακτινοβολίας από την φυλλική επιφάνεια και η δομή της φυλλικής επιφάνειας (Wilhelm et al., 2000). Οι μέθοδοι αυτές δεν είναι καταστροφικές και προσεγγίζουν το φύλλο ως αντικείμενο (ή το συμπλήρωμά του, ή την πυκνότητα της φυλλικής επιφάνειας), την κατανομή του και την θέση στην οποία βρίσκεται με βάση τη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής (Bréda, 2003).

Από την ανάπτυξη θεωριών και εξισώσεων έχουν κατασκευαστεί διάφορες συσκευές που μετρούν έμμεσα το δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Μερικές από αυτές είναι η LI-COR LAI-2000, LI-COR Li-3000A, Decagon AccuPAR και Delta-T Devices SunScan.

8.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ LAI

8.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε έμμεση αλλά και άμεση μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Για την έμμεση μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Delta-T Devices SunScan. Οι μετρήσεις του LAI πραγματοποιούνταν κάθε εβδομάδα. Συνολικά ελήφθησαν 18 μετρήσεις για τα έτη 2007 και 2008 και 17 μετρήσεις για το έτος 2009. Οι μετρήσεις του LAI γίνονταν κάθε εβδομάδα με σκοπό να συγκεντρωθεί ικανός αριθμός για να μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για την εξαγωγή μοντέλου πρόβλεψης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας από ανεξάρτητες παραμέτρους. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν στο ίδιο σημείο της κάθε επανάληψης, το οποίο είχε έκταση 2,0m^2 (ίση με το μήκος 2,5 μέτρων επί το πλάτος του εδάφους που εκμεταλλεύονταν τα φυτά στη συγκεκριμένη γραμμή σποράς). Η θέση αυτή καθορίστηκε κατά την πρώτη μέτρηση με γνώμονα την ομοιομορφία ανάπτυξης των φυτών στις δύο μεσαίες γραμμές σποράς έτσι ώστε να μειώνεται η αλληλεπίδραση με γειτονικά πειραματικά τεμάχια στο ελάχιστο. Σε κάθε σημείο μέτρησης, παράλληλα προς τις γραμμές σποράς, λαμβάνονταν 4 μετρήσεις, δύο μετρήσεις εκατέρωθεν της γραμμής σποράς, και ο μέσος όρος των τιμών αυτών καταγράφονταν ως το LAI του συγκεκριμένου πειραματικού τεμαχίου.

Για την πραγματοποίηση της άμεσης μέτρησης του LAI εφαρμόστηκε για πρώτη φορά μια εναλλακτική μέθοδος. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, στη μεταχείριση Ε100, μετά από κάθε μέτρηση LAI γινόταν η δειγματοληψία για τον

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

υπολογισμό της χλωρής και ξηρής βιομάζας του φυτού. Το φυτό χωρίζονταν σε τρία μέρη (φύλλα, στέλεχος και ταξιανθία). Μετά τη ζύγιση και πριν τα φύλλα ξεραθούν σε ειδικό φούρνο τοποθετούνταν στο έδαφος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν μία τετραγωνική επιφάνεια. Στη συνέχεια λαμβάνονταν από κατάλληλο ύψος φωτογραφία με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και στη συνέχεια γινόταν επεξεργασία και μέτρηση της περιμέτρου της επιφάνειας που κάλυπταν τα κομμένα φύλλα με το ειδικό πρόγραμμα σχεδίασης AutoCAD. Τα αποτελέσματα συγκρίνονταν με τις μετρήσεις που λαμβάνονταν από το σύστημα SunScan.

8.3.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI)

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας παρουσίασε διακυμάνσεις. Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε κατά την περίοδο μεταξύ της εκατοστής και της εκατοστής δέκατης έκτης ημέρας από τη σπορά. Οι μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως έδωσαν μεγαλύτερες τιμές LAI ενώ όσες μεταχειρίσεις δέχτηκαν ελλειμματική άρδευση είχαν μικρότερη τιμή LAI.

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπήρχαν διαφορές στο δείκτη φυλλικής επιφάνειας μεταξύ των μεταχειρίσεων και των ετών της έρευνας όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8.1.

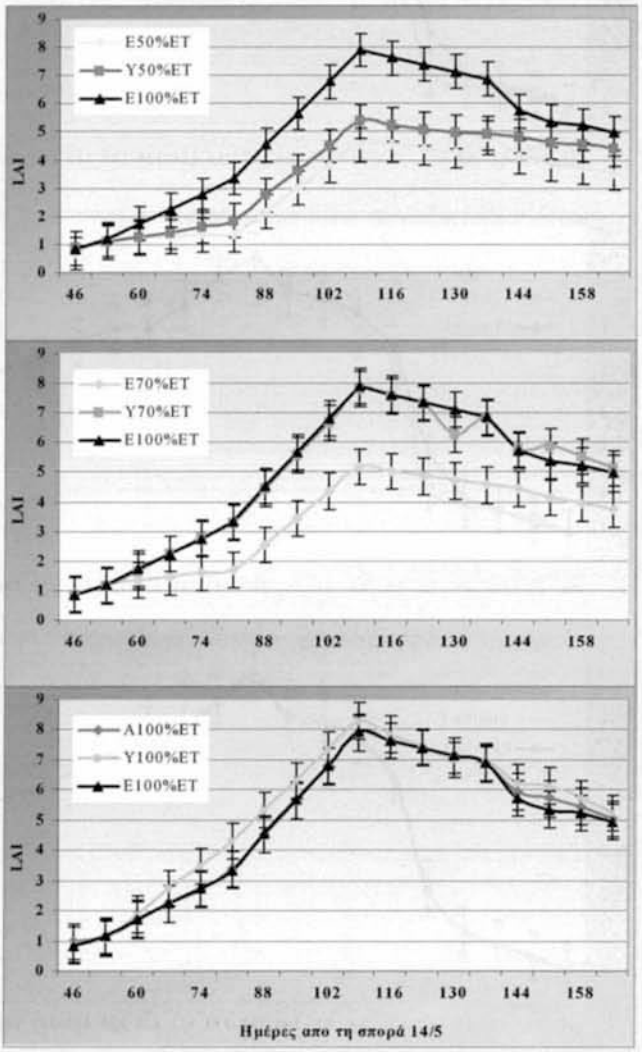
Πίνακας 8.1: Διαφορές στην μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση.

	ΕΤΟΣ	A100	E50	E70	E100	Y50	Y70	Y100
Δείκτης φυλλικής Επιφάνειας (LAI) CV=9,89%	2007	7,88a	4,55c	5,18bc	7,90a	5,38b	7,80a	8,28a
	2008	8,13ab	6,78e	7,48cd	7,90bc	7,20de	8,15ab	8,48a
	2009	8,08a	5,48c	6,83b	8,08a	6,48b	7,90a	8,15a
	M.O.	8,03a	5,60c	6,50b	7,96a	6,35b	7,95a	8,30a

Η μέση μέγιστη τιμή LAI για τις επιφανειακές μεταχειρίσεις ήταν 5,87 για το έτος 2007, 7,49 για το 2008 και 6,79 για το 2009. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των ετών οφείλονταν κυρίως σε προβλήματα φυτρωτικότητας λόγω βροχοπτώσεων μετά τη σπορά το έτος 2007, οι οποίες είχαν ως συνέπεια να δημιουργηθεί κρούστα στην επιφάνεια του εδάφους παρεμποδίζοντας το φύτρωμα του σπόρου. Την καλλιεργητική περίοδο 2009 η ελαφρά μείωση της τιμής του LAI οφείλονταν κυρίως στην μειωμένη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων του εδάφους λόγω της τριετούς καλλιέργειας του σόργου υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών. Οι αντίστοιχες μέσες τιμές LAI για τις υπόγειες μεταχειρίσεις ήταν 7,15 για το έτος 2007, 7,94 για το 2008 και 7,51 για το 2009. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των ετών δεν ήταν σημαντικές και το γεγονός αυτό

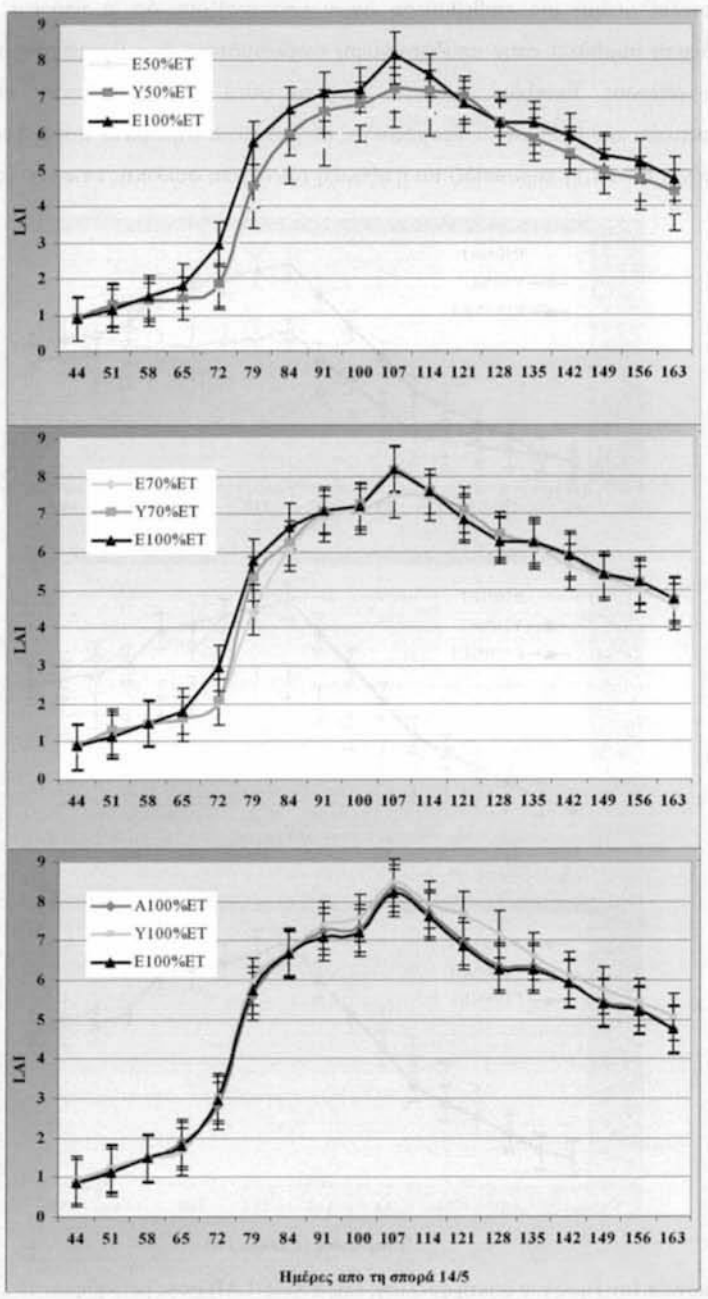
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

αποτελεί ακόμη μια επιβεβαίωση όσων υποστηρίζουν ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση συμβάλει στην αποδοτικότερη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Επιπλέον, φαίνεται πως τα φυτά εκμεταλλεύτηκαν ποσότητες θρεπτικών που βρίσκονταν δεσμευμένες σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Στις Εικόνες 8.1α-8.1γ παρουσιάζεται η εξέλιξη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI).



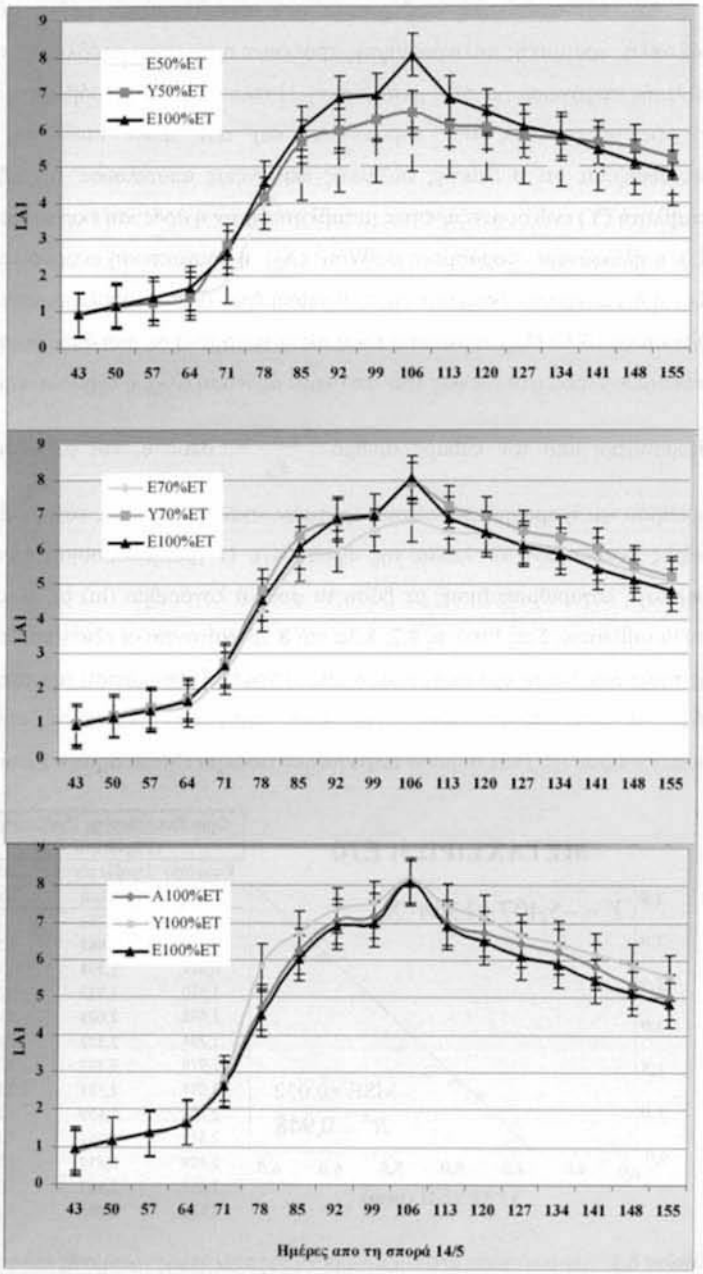
Εικόνα 8.1α: Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2007.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 8.1β: Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2008.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

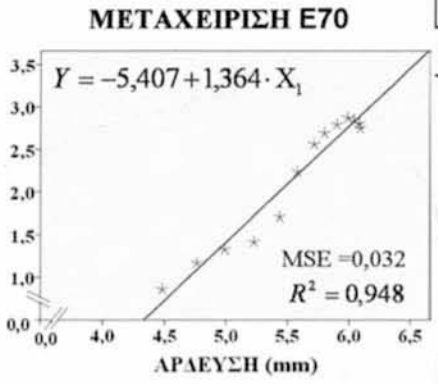


Εικόνα 8.1γ: Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρηθήκαν το έτος 2009.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

8.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε η εξίσωση πρόβλεψης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας για κάθε μεταχείριση. Η τελική εξίσωση πρόβλεψης προέκυψε από τις μέσες τιμές των παραμέτρων και των τριών ετών της έρευνας. Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας αποτελούσε την εξαρτημένη μεταβλητή (Y) ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άρδευση εκφρασμένη σε mm (X_1), η ηλιοφάνεια εκφρασμένη σε W/m^2 (X_2), η βροχόπτωση εκφρασμένη σε mm (X_3), η θερμοκρασία εκφρασμένη σε θερμοημέρες (θερμοκρασία αναφοράς για το σόργο τους 10^oC) (X_4), η υγρασία εδάφους εκφρασμένη σε mm αποθηκευμένου και διαθέσιμου νερού στο έδαφος πριν από κάθε άρδευση (X_5), η υγρασία ατμόσφαιρας (εκφρασμένη από τον καθαρό αριθμό $\frac{e_a - e_d}{e_d}$, όπου e_a και e_d είναι η πίεση κορεσμού και η πραγματική πίεση υδρατμών, αντίστοιχα) (X_6), και η διάρκεια της ημέρας εκφρασμένη σε λεπτά της ώρας (X_7). Η γραμμικοποίηση έγινε με την εφαρμογή λογαριθμοποίησης με βάση το φυσικό λογάριθμο (ln) σε όλες τις τιμές των μεταβλητών. Στις Εικόνες 8.2, 8.3α και 8.3β φαίνονται οι εξισώσεις πρόβλεψης της τιμής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, η γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών LAI, τα όρια εμπιστοσύνης για κάθε τιμή, ο πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error, MSE).

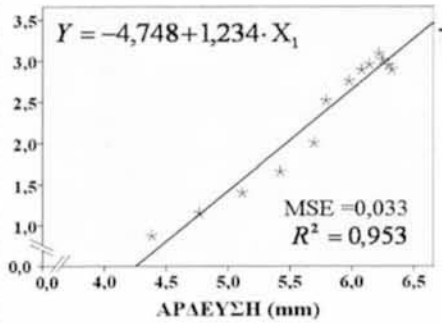


Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,235	**0,701**	1,169
0,649	**1,089**	1,531
0,974	**1,398**	1,824
1,310	**1,723**	2,137
1,598	**2,006**	2,416
1,794	**2,202**	2,611
1,979	**2,387**	2,798
2,091	**2,501**	2,914
2,224	**2,639**	3,054
2,343	**2,761**	3,180
2,409	**2,830**	3,252
2,464	**2,887**	3,311
2,471	**2,895**	3,320

Εικόνα 8.2: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων της μεταχείρισης Ε70.

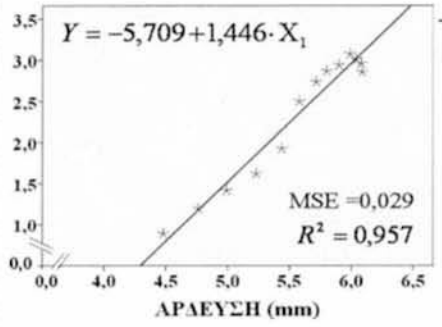
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Α100



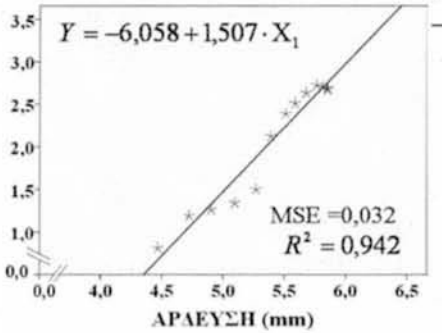
Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,184	**0,662**	1,142
0,688	**1,134**	1,583
1,138	**1,564**	1,991
1,528	**1,943**	2,359
1,868	**2,279**	2,692
1,985	**2,396**	2,809
2,214	**2,628**	3,043
2,335	**2,751**	3,168
2,412	**2,830**	3,250
2,503	**2,924**	3,346
2,543	**2,965**	3,389
2,599	**3,023**	3,449
2,629	**3,053**	3,480

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ70



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,320	**0,766**	1,213
0,756	**1,177**	1,598
1,102	**1,508**	1,914
1,459	**1,854**	2,249
1,763	**2,153**	2,544
1,967	**2,357**	2,747
2,161	**2,552**	2,943
2,280	**2,674**	3,067
2,422	**2,818**	3,215
2,548	**2,948**	3,348
2,616	**3,018**	3,421
2,674	**3,079**	3,483
2,682	**3,087**	3,492

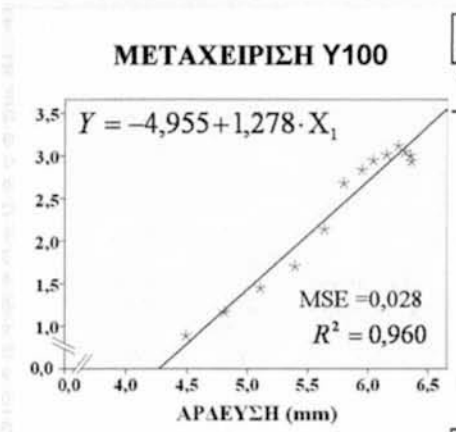
ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Ε50



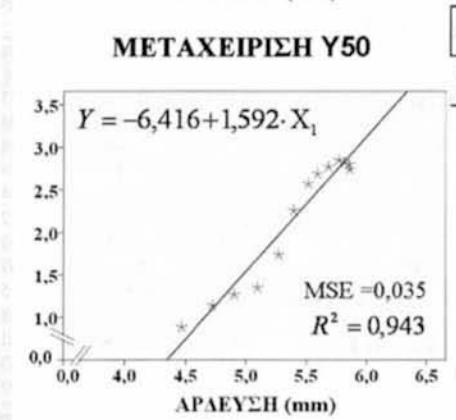
Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,206	**0,674**	1,141
0,618	**1,058**	1,498
0,902	**1,328**	1,754
1,205	**1,620**	2,035
1,472	**1,882**	2,292
1,655	**2,065**	2,474
1,833	**2,244**	2,654
1,946	**2,358**	2,771
2,079	**2,495**	2,911
2,202	**2,622**	3,042
2,272	**2,695**	3,118
2,327	**2,752**	3,178
2,335	**2,762**	3,187

Εικόνα 8.3α: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Α100, Υ70 και Ε50.

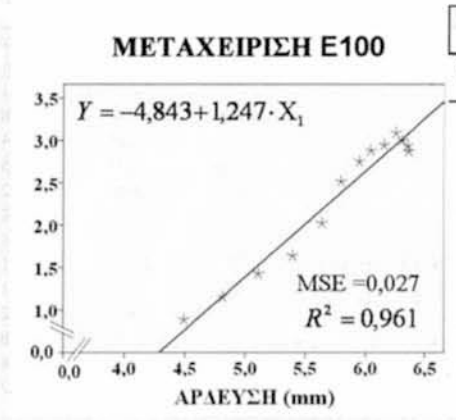
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,454	**0,784**	1,163
0,768	**1,196**	1,451
1,153	**1,571**	1,810
1,628	**1,936**	2,253
2,015	**2,247**	2,650
2,210	**2,452**	2,840
2,418	**2,646**	3,056
2,479	**2,765**	3,104
2,652	**2,906**	3,289
2,800	**3,030**	3,453
2,840	**3,100**	3,485
2,655	**3,158**	3,343
2,564	**3,167**	3,305



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,303	**0,696**	1,147
0,680	**1,102**	1,474
0,869	**1,390**	1,671
1,270	**1,695**	2,023
1,653	**1,972**	2,399
1,859	**2,168**	2,607
2,079	**2,359**	2,847
2,161	**2,481**	2,912
2,319	**2,625**	3,083
2,470	**2,760**	3,252
2,486	**2,836**	3,250
2,446	**2,897**	3,222
2,175	**2,907**	3,103



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
0,418	**0,757**	1,142
0,737	**1,160**	1,434
1,114	**1,528**	1,785
1,567	**1,880**	2,205
1,939	**2,184**	2,587
2,129	**2,384**	2,771
2,331	**2,575**	2,983
2,397	**2,690**	3,035
2,563	**2,829**	3,214
2,706	**2,952**	3,374
2,747	**3,019**	3,406
2,584	**3,075**	3,287
2,501	**3,085**	3,258

Εικόνα 8.3β: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ100, Υ50 και Ε100.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι εξισώσεις που προέκυψαν περιγράφουν πάνω από το 94% των περιπτώσεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε όλες τις μεταχειρίσεις κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η άρδευση. Ωστόσο, σε ορισμένες από αυτές, εκτός από την άρδευση κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή αποτελεί και η βροχόπτωση (μεταχειρίσεις Υ100 και Ε100) καθώς και η εδαφική υγρασία (μεταχείριση Ε50). Οι εξισώσεις πρόβλεψης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σε αυτές τις τρείς μεταχειρίσεις είναι:

Υ100: $Y = -3,349+1,611X_1-0,862X_3$ ($R^2 = 0,977$ και MSE = 0,018)

Ε100: $Y = -3,409+1,545X_1-0,769X_3$ ($R^2 = 0,975$ και MSE = 0,019)

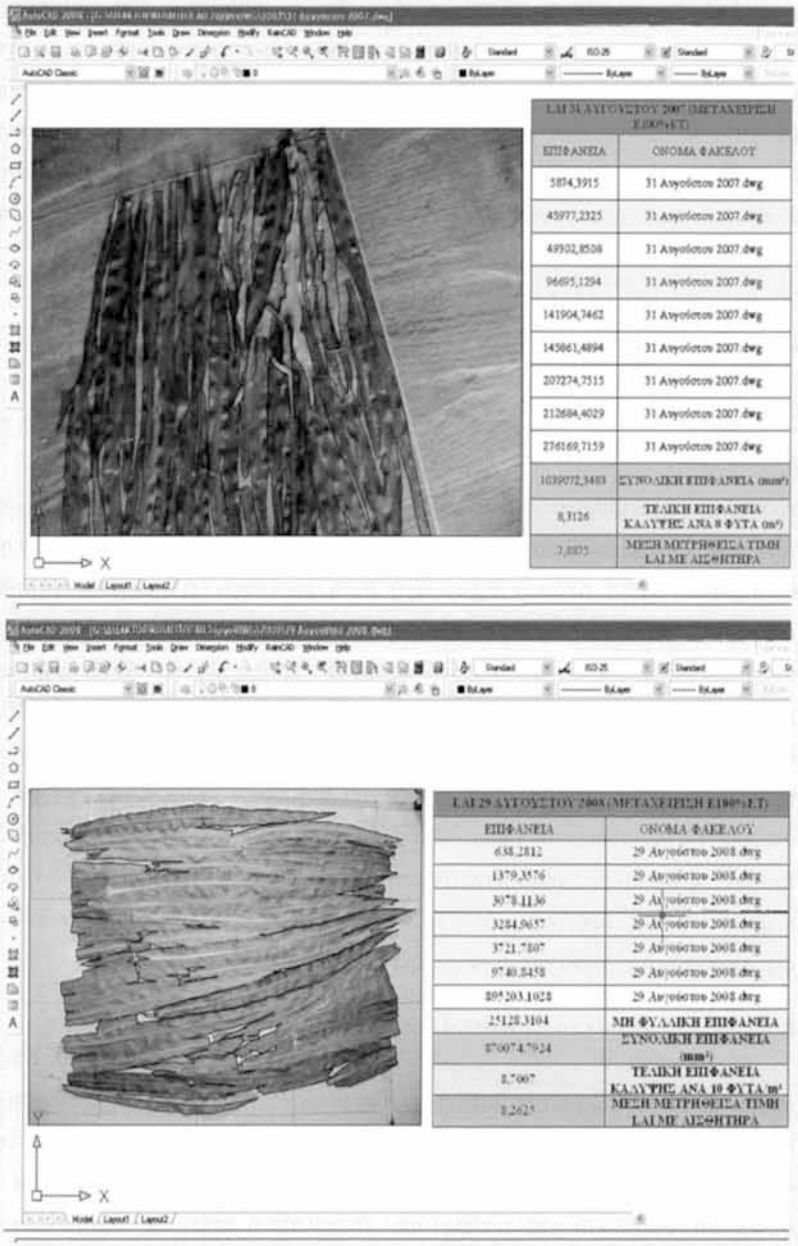
Υ50: $Y = -0,915+4,474X_1-2,834X_5$ ($R^2 = 0,962$ και MSE = 0,025)

Σημειώνεται ότι στις μεταχειρίσεις Υ100 και Ε100 το συνολικό νερό (άρδευση και βροχόπτωση) επηρεάζει την διαμόρφωση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Η προσθήκη της ανεξάρτητης μεταβλητής X_3 (βροχόπτωση) συμβάλει στη βελτίωση του μοντέλου (μείωση του MSE) κατά 35,7% (μεταχείριση Υ100) και 29,6% (μεταχείριση Ε100). Από την παρατήρηση αυτή, προκύπτει ότι η μεγάλη ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας στις μεταχειρίσεις Υ100 και Ε100 οφείλεται στην συνεργιστική δράση του νερού άρδευσης και των βροχοπτώσεων. Αντίστοιχα, στη μεταχείριση Υ50, εκτός της άρδευσης, το έλλειμμα της εδαφικής υγρασίας συνέβαλε σημαντικά στη διαμόρφωση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (μείωση του MSE σε ποσοστό 28,6%). Από την στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές δεν περιγράφουν ικανοποιητικά την μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Επομένως, από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται η κρισιμότητα της άρδευσης όταν οι κλιματολογικές συνθήκες δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη του φυτού.

8.3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΜΕΣΗΣ-ΕΜΜΕΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ LAI

Στις παρακάτω Εικόνες 8.4α-8.4β παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με την έμμεση μέθοδο μέτρησης SunScan και την άμεση με εμβαδομέτρηση της φυλλικής επιφάνειας με το πρόγραμμα AutoCAD. Υπενθυμίζεται ότι η εμβαδομέτρηση πραγματοποιούνταν σε όλα τα φύλλα του φυτού και στη συνέχεια από τη συνολική επιφάνεια αφαιρούνταν η επιφάνεια που κάλυπταν τα ξηρά φύλλα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

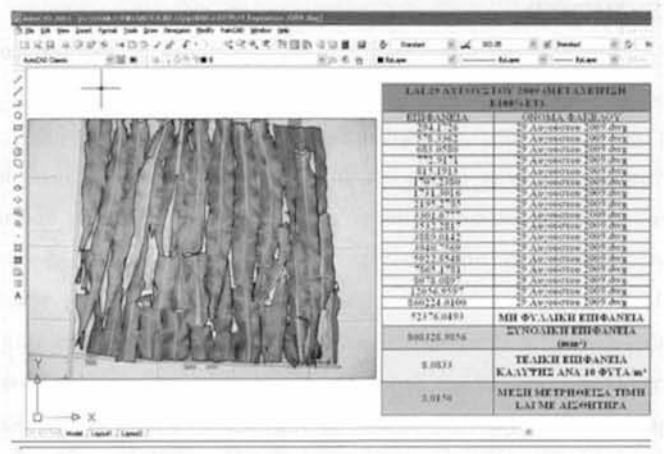


ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΟΝΟΜΑ ΦΑΚΕΛΟΥ
5874,3915	31 Αυγούστου 2007.dwg
45977,2325	31 Αυγούστου 2007.dwg
49302,8508	31 Αυγούστου 2007.dwg
96695,1294	31 Αυγούστου 2007.dwg
141904,7462	31 Αυγούστου 2007.dwg
145861,4894	31 Αυγούστου 2007.dwg
207274,7515	31 Αυγούστου 2007.dwg
212684,4029	31 Αυγούστου 2007.dwg
276169,7159	31 Αυγούστου 2007.dwg
1039072,3403	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (mm²)
8,3126	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΥΨΗΣ ΑΝΑ 8 ΦΥΤΑ (m²)
2,8875	ΜΕΣΗ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΑ ΤΙΜΗ ΑΙ ΜΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΟΝΟΜΑ ΦΑΚΕΛΟΥ
638.2812	29 Αυγούστου 2008.dwg
1379.3576	29 Αυγούστου 2008.dwg
3078.1136	29 Αυγούστου 2008.dwg
3284.9657	29 Αυγούστου 2008.dwg
3721.7807	29 Αυγούστου 2008.dwg
9740.5458	29 Αυγούστου 2008.dwg
895203.1028	29 Αυγούστου 2008.dwg
25128.3104	ΜΗ ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
87007.4.7924	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (mm²)
8.7007	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΥΨΗΣ ΑΝΑ 10 ΦΥΤΑ (m²)
3.2625	ΜΕΣΗ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΑ ΤΙΜΗ ΑΙ ΜΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Εικόνα 8.4α: Ενδεικτική απεικόνιση εμβαδομέτρησης φυλλικής επιφάνειας φυτού της μεταχείρισης Ε100 σε περιβάλλον εργασίας AutoCAD για τα έτη 2007 (πάνω) και 2008 (κάτω).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



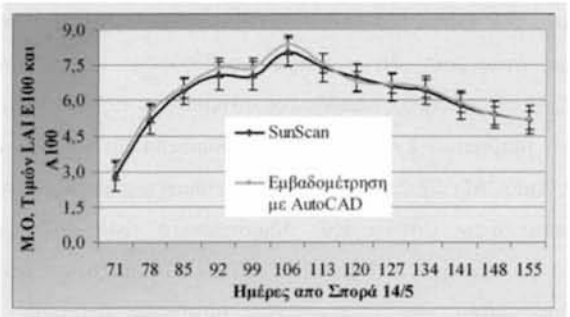
Εικόνα 8.4β: Ενδεικτική απεικόνιση εμβαδομέτρησης φυλλικής επιφάνειας φυτού της μεταχείρισης Ε100 σε περιβάλλον εργασίας AutoCAD για το έτος 2009.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εμβαδομέτρησης με το πρόγραμμα AutoCAD και τη συλλογή των μετρήσεων με τη συσκευή SunScan ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων εφαρμόζοντας το T-Test κριτήριο για πιθανότητα 95%. Η στατιστική επεξεργασία έγινε επί των μέσων όρων των μετρήσεων της τριετίας. Η υπόθεση που έγινε ήταν:

H_0: οι δυο μέθοδοι δεν διαφέρουν ως προς τις μετρήσεις του LAI που δίνουν

H_1: οι δυο μέθοδοι διαφέρουν ως προς τις μετρήσεις του LAI που δίνουν

Το στατιστικό πακέτο του MS Excel έδειξε ότι για πιθανότητα 95% και 12 βαθμούς ελευθερίας το $t<t_{0.05,\ 12}$. Επομένως γίνεται αποδεκτή η μηδενική υπόθεση, δηλαδή η δύο μέθοδοι δεν δίνουν διαφορετικές μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, γεγονός που αποτυπώνεται και στο παρακάτω Εικόνα 8.5.



Εικόνα 8.5: Μέσες τιμές LAI όπως μετρήθηκαν με τη συσκευή SunScan και την εμβαδομέτρηση με AutoCAD την τριετία 2007-2009.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

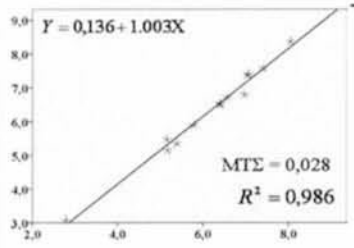
8.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά σε σύγκριση με αυτές που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης συμπεριλαμβανομένης και της μεταχείρισης Υ70. Η στατιστική επεξεργασία έδειξε ότι οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν ελλειμματικά και αυτών που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης ήταν σημαντικές για επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Η ανάπτυξη του σόργου και επομένως και η διακύμανση του LAI ήταν παρόμοια και τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους. Η μέση μέγιστη τιμή LAI που παρατηρήθηκε ήταν 7,82 και διαμορφώθηκε περίπου στο τέλος Αυγούστου για τις συνθήκες της περιοχής Βελεστίνου. Οι Dolciotti et al., (1998) και Sakellariou-Makrantonaki et al., (2005e, 2007a) αναφέρουν ότι αντίστοιχες μέγιστες τιμές LAI για την περιοχή Βελεστίνου σε καλλιέργεια ινώδους και γλυκού σόργου διαμορφώθηκαν περίπου στις 15 Σεπτεμβρίου. Οι Mastrorilli et al., (1995) αναφέρουν μέσες μέγιστες τιμές LAI κοντά στην τιμή 7 για γλυκό σόργο. Οι Faci and Fereres (1980) αναφέρουν ότι το μέγιστο ποσοστό κάλυψης εδάφους από τη φυλλική επιφάνεια φυτών καρποδοτικού σόργου διαμορφώθηκε περίπου 100 ημέρες μετά τη σπορά (18/5/1977). Η μέση μέγιστη τιμή του LAI για τις μεταχειρίσεις που δέχτηκαν την μικρότερη δόση άρδευσης (50% της ΕΤ) διαμορφώθηκε περίπου 2 μονάδες χαμηλότερα σε σύγκριση με τη μέση μέγιστη τιμή LAI που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως, γεγονός που συμφωνεί με τις παρατηρήσεις άλλων ερευνητών στον Ελλαδικό χώρο (Dercas and Liakatas, 1999). Στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου όλες οι μεταχειρίσεις είχαν περίπου την ίδια τιμή LAI γεγονός που συμφωνεί σχεδόν απόλυτα με τα αποτελέσματα των Derca and Liakata, (1999) σε καλλιέργεια γλυκού σόργου, οι οποίοι όμως αναφέρουν ότι η πλήρως αρδευόμενη μεταχείριση παρουσίασε μικρότερο LAI στο τέλος της περιόδου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων LAI με τη μέθοδο SunScan και η εμβαδομέτρηση με το πρόγραμμα AutoCAD έδειξε ότι δεν υπήρχαν διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.6. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ αναμένονταν μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές LAI μεταξύ των μετρήσεων με τις δυο μεθόδους λόγω των διαφορετικών συνθηκών μέτρησης της φυλλικής επιφάνειας εντούτοις οι διαφορές αυτές δεν παρατηρήθηκαν στην πράξη. Το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

γεγονός αυτό ίσως να σημαίνει ότι η γωνία που σχηματίζουν τα φύλλα του σόργου, όταν είναι προσαρτημένα στο στέλεχος, με το έδαφος τείνει να είναι αρκετά μικρή. Σημαντική γραμμική συσχέτιση άμεσων και έμμεσων μεθόδων μέτρησης LAI βρήκαν και οι Kirk et al., (2009) σε αντίστοιχες έρευνες σε σιτηρά.



Όρια Εμπιστοσύνης για Πιθανότητα		
Κατώτερη Τιμή	**Προβλεπόμενη Τιμή**	Ανώτερη Τιμή
2,455	**2,924**	3,390
4,918	**5,306**	5,700
6,169	**6,555**	6,936
6,834	**7,227**	7,613
6,805	**7,200**	7,583
7,795	**8,213**	8,617
7,169	**7,568**	7,960
6,735	**7,124**	7,512
6,338	**6,726**	7,107
6,179	**6,562**	6,946
5,556	**5,947**	6,325
5,152	**5,542**	5,928
4,928	**5,318**	5,710

Εικόνα 8.6: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας των μετρήσεων LAI με τη μέθοδο SunScan και τη εμβαδομέτρηση με AutoCAD.

Οι μεταχειρίσεις E100 και A100 αν και δέχτηκαν διαφορετική συνολική ποσότητα νερού άρδευσης δεν παρουσίασαν διαφορές ως προς την τιμή του LAI. Υπενθυμίζεται ότι στη μεταχείριση E100 η δόση άρδευσης υπολογίστηκε με τη χρήση εξατμισίμετρου τύπου Α ενώ στην μεταχείριση A100 η δόση άρδευσης υπολογίστηκε με τη χρήση αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^{Ο}

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Γ. ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται η επίδραση της μεθόδου στάγδην άρδευσης (επιφανειακής και υπόγειας) και της δόσης άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας. Μελετάται η μεταβολή του ύψους του φυτού, η τελική απόδοση σε ξηρή βιομάζα και η ενέργεια που παράγεται από την αντίστοιχη ξηρή βιομάζα. Τέλος, γίνεται αναφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο των μεταχειρίσεων.

9.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

9.2.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις του ύψους πραγματοποιούνταν την ίδια ημέρα κάθε εβδομάδας. Η εναρκτήρια μέτρηση πραγματοποιούνταν την 30^{η} ημέρα από τη σπορά και ολοκληρώνονταν την 156^{η}. Το ύψος του κεντρικού στελέχους του φυτού μετρούνταν από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι το σημείο έκπτυξης του φύλλου σημαίας (σημείο έκπτυξης της ταξιανθίας από το στέλεχος). Οι μετρήσεις ύψους πραγματοποιούνταν σε συγκεκριμένα φυτά που κάλυπταν μήκος 2,5m επί των δύο μεσαίων γραμμών σποράς της κάθε επανάληψης (plot) για την αποφυγή τυχόν αλληλεπιδράσεων με τα φυτά των γειτονικών πειραματικών τεμαχίων. Κάθε καλλιεργητική περίοδο λαμβάνονταν μέριμνα ώστε οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται σε φυτά αντιπροσωπευτικά του μέσου όρου των φυτών της φυτείας.

9.2.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΦΥΤΩΝ

Κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς το ύψος του κεντρικού στελέχους των φυτών. Η γενική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

τάση που παρατηρήθηκε ήταν ότι ο μέσος όρος του ύψους των φυτών στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση ήταν μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν με επιφανειακή στάγδην άρδευση.

Αρχικά τα φυτά αναπτύσσονταν με παρόμοιο ρυθμό. Ο μέσος αρχικός ρυθμός ανάπτυξης των φυτών για την τριετία 2007-2009 για την περίοδο από αρχές Ιουνίου έως και τα μέσα Ιουλίου κυμαίνονταν μεταξύ 1,9-2,1cm/ημέρα. Η ομοιομορφία στην ανάπτυξη οφείλονταν:

- στην ομοιομορφία σποράς,
- στην ομοιομορφία καλλιεργητικών πρακτικών μετά τη σπορά και
- στην ομοιομορφία της άρδευσης με καταιονισμό που εφαρμόζονταν έως την 46η ημέρα από τη σπορά και επηρέαζε την ανάπτυξη των φυτών έως την 67η ημέρα από τη σπορά. (δεύτερο δεκαήμερο του Ιούλη).

Τη χρονική περίοδο από τις 15/7 έως το τέλος του δεύτερου δεκαημέρου του Αυγούστου οι ρυθμοί ανάπτυξης των φυτών διέφεραν ανάλογα με τη δόση αλλά και με τη μέθοδο άρδευσης που εφαρμόστηκε. Αναλυτικότερα, οι μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως καθώς και η μεταχείριση Υ70 πέτυχαν ρυθμό ανάπτυξης που κυμαίνονταν μεταξύ 4,8 και 5,7cm/ημέρα. Μικρότεροι ρυθμοί ανάπτυξης παρατηρήθηκαν στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά και συγκεκριμένα οι τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 2,7 και 5,5cm/ημέρα. Τις επόμενες 39 ημέρες ως το τέλος Σεπτεμβρίου ο ρυθμός ανάπτυξης κυμάνθηκε μεταξύ 1,2 και 1,5cm/ημέρα για το σύνολο των μεταχειρίσεων.

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπήρχαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς το ύψος του κεντρικού στελέχους του φυτού όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.1.

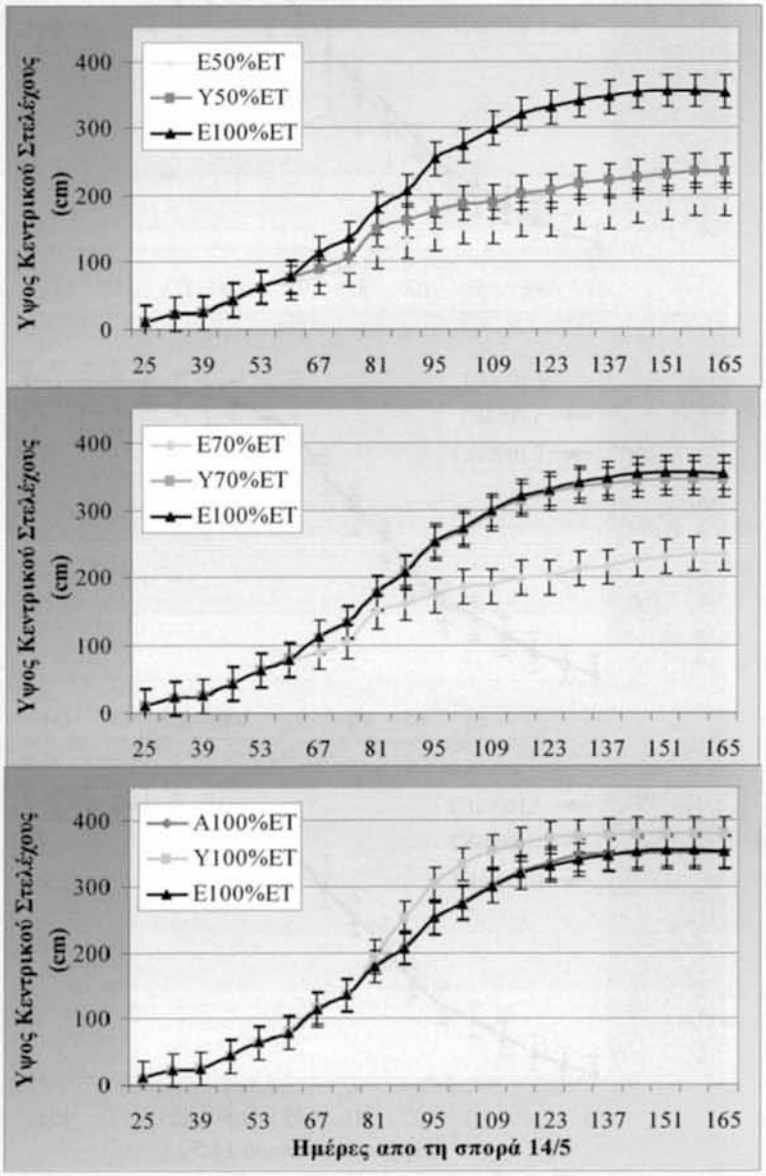
Πίνακας 9.1: Διαφορές στην μεταβολή του ύψους κεντρικού στελέχους φυτού την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση.

	ΕΤΟΣ	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Υ50	Υ70	Υ100
Ύψος Κεντρικού Στελέχους Φυτού (cm)	2007	351,8b	193,0d	233,9c	355,4b	235,1c	346,1b	381,1a
	2008	391,8b	321,6c	376,8b	386,6b	367,1b	388,5b	429,5a
	2009	332,9b	235,5d	293,9c	335,3b	292,0c	326,6b	345,6a
CV=15,46%	M.O.	358,8a	250,0b	301,5ab	359,1a	298,1ab	353,8a	385,4a

Οι πλήρως αρδευόμενες μεταχειρίσεις παρουσίασαν σημαντικά μεγαλύτερο ύψος από τις ελλειμματικά αρδευόμενες (εκτός της Υ70). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μεταχείριση Υ70 είχε ρυθμό ανάπτυξης παρόμοιο με αυτό των μεταχειρίσεων

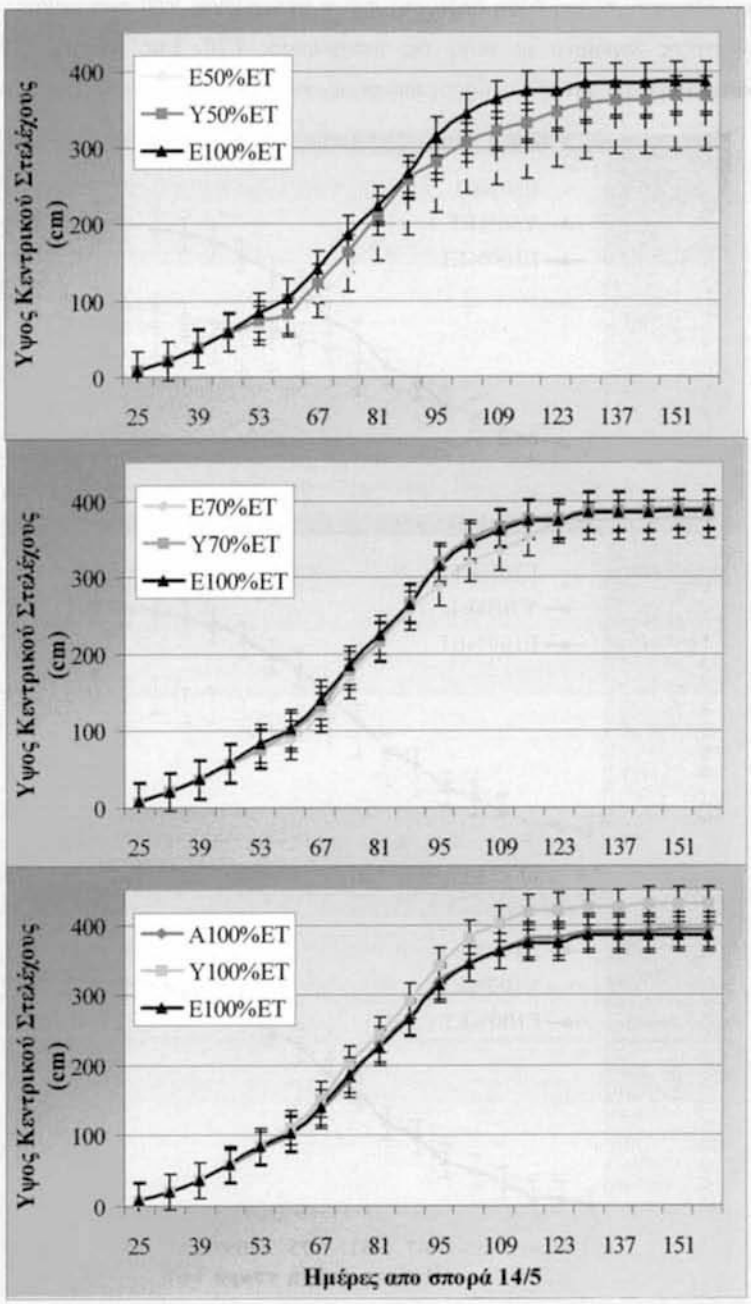
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης ενώ η μεταχείριση Υ50 παρουσίασε ρυθμό ανάπτυξης παρόμοιο με αυτό της μεταχείρισης Ε70. Στις Εικόνες 9.1α-9.1γ φαίνεται η διακύμανση του ύψους των φυτών για κάθε μία καλλιεργητική περίοδο.



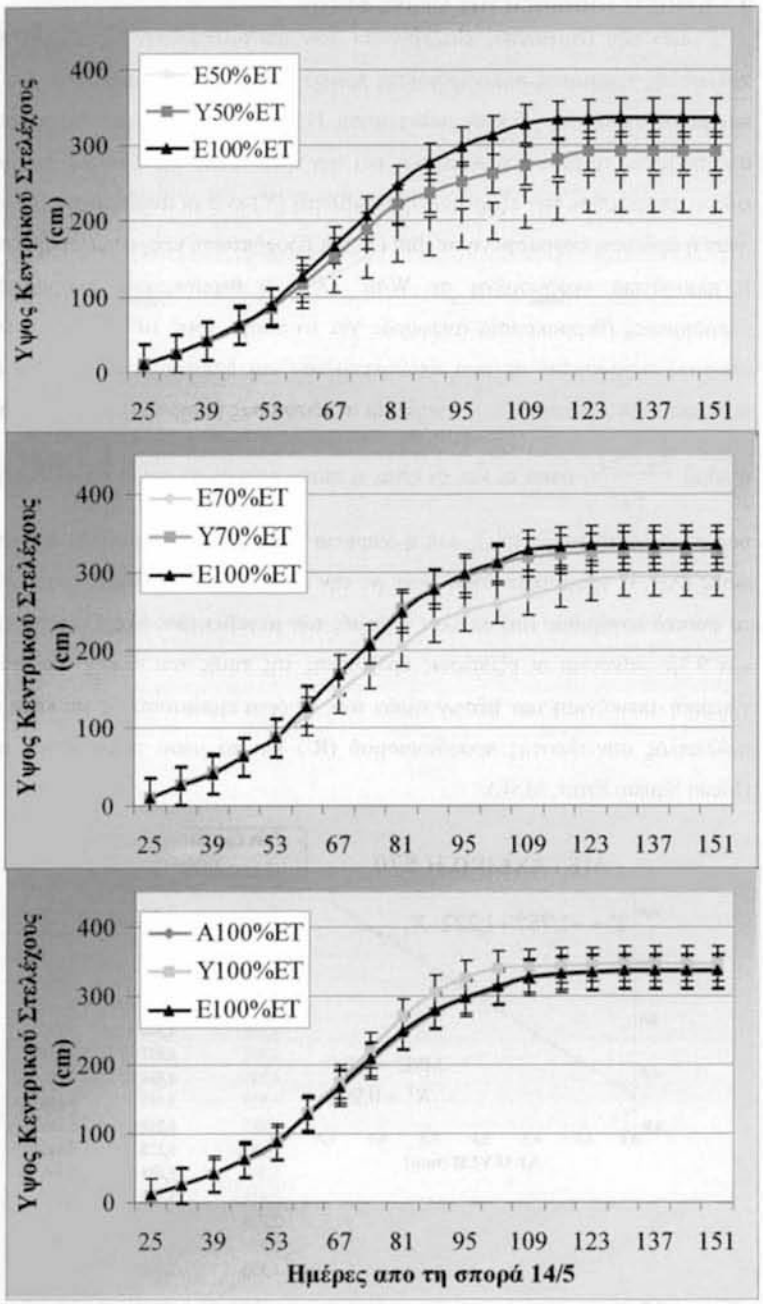
Εικόνα 9.1α: Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2007.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 9.1β: Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2008.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

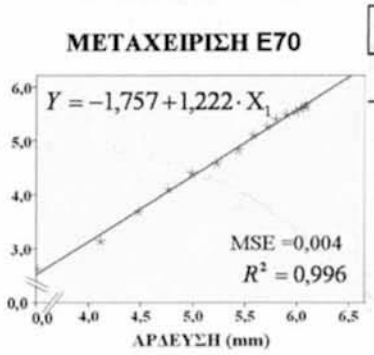


Εικόνα 9.1γ: Τιμές του ύψους κεντρικού στελέχους όπως μετρηθήκαν το έτος 2009.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΦΥΤΟΥ

Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε η εξίσωση πρόβλεψης του ύψους κεντρικού στελέχους για κάθε μεταχείριση. Η τελική εξίσωση πρόβλεψης προέκυψε από τις μέσες τιμές των παραμέτρων και των τριών ετών της έρευνας. Το ύψος του φυτού αποτελούσε την εξαρτημένη μεταβλητή (Y) ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άρδευση εκφρασμένη σε mm (X_1), η βροχόπτωση εκφρασμένη σε mm (X_2), η ηλιοφάνεια εκφρασμένη σε W/m^2 (X_2), η θερμοκρασία εκφρασμένη σε θερμοημέρες (θερμοκρασία αναφοράς για το σόργο τους 10^oC) (X_4), η υγρασία εδάφους εκφρασμένη σε mm αποθηκευμένου και διαθέσιμου νερού στο έδαφος πριν από κάθε άρδευση (X_5), η υγρασία ατμόσφαιρας (εκφρασμένη από τον καθαρό αριθμό $\frac{e_a - e_d}{e_d}$, όπου e_a και e_d είναι η πίεση κορεσμού και η πραγματική πίεση υδρατμών, αντίστοιχα) (X_6), και η διάρκεια της ημέρας εκφρασμένη σε λεπτά της ώρας (X_7). Η γραμμικοποίηση έγινε με την εφαρμογή λογαριθμοποίησης με βάση το φυσικό λογάριθμο (ln) σε όλες τις τιμές των μεταβλητών. Στις Εικόνες 9.2, 9.3α και 9.3β φαίνονται οι εξισώσεις πρόβλεψης της τιμής του ύψους των φυτών, η γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών του, τα όρια εμπιστοσύνης για κάθε τιμή, ο πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error, MSE).

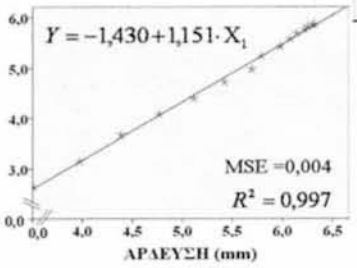


Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
2,373	**2,534**	2,692
3,117	**3,266**	3,413
3,571	**3,715**	3,856
3,921	**4,063**	4,201
4,199	**4,340**	4,476
4,491	**4,631**	4,766
4,745	**4,884**	5,020
4,919	**5,060**	5,196
5,085	**5,226**	5,363
5,187	**5,328**	5,465
5,309	**5,451**	5,589
5,417	**5,560**	5,699
5,478	**5,622**	5,761
5,529	**5,673**	5,813
5,536	**5,680**	5,820

Εικόνα 9.2: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων της μεταχείρισης Ε70.

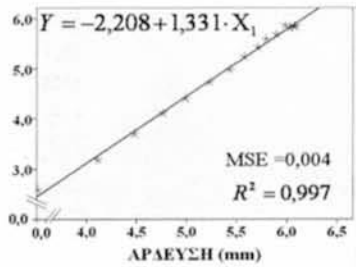
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Α100



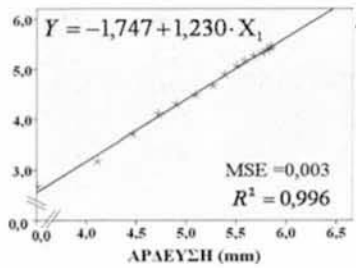
Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
2,499	**1,446**	2,721
3,076	**2,111**	3,293
3,555	**2,662**	3,765
3,955	**3,122**	4,153
4,321	**3,543**	4,521
4,656	**3,930**	4,861
4,962	**4,282**	5,170
5,106	**4,447**	5,305
5,311	**4,683**	5,513
5,433	**4,823**	5,634
5,538	**4,944**	5,736
5,648	**5,071**	5,848
5,704	**5,135**	5,909
5,767	**5,208**	5,977
5,807	**5,254**	6,023

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ70



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
2,421	**2,466**	2,692
3,139	**3,264**	3,359
3,612	**3,752**	3,828
3,955	**4,130**	4,177
4,252	**4,435**	4,475
4,610	**4,753**	4,823
4,930	**5,029**	5,144
5,126	**5,217**	5,340
5,317	**5,396**	5,534
5,425	**5,508**	5,635
5,568	**5,641**	5,781
5,695	**5,760**	5,911
5,743	**5,825**	5,958
5,770	**5,881**	5,991
5,711	**5,889**	5,964

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Ε50

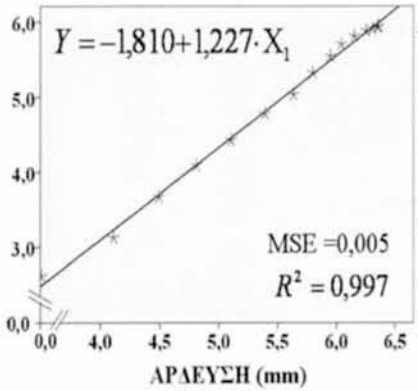


Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
2,422	**2,572**	2,725
3,172	**3,309**	3,450
3,616	**3,747**	3,883
3,932	**4,061**	4,195
4,154	**4,282**	4,414
4,392	**4,520**	4,651
4,606	**4,734**	4,865
4,755	**4,883**	5,015
4,901	**5,029**	5,162
4,994	**5,122**	5,256
5,105	**5,234**	5,368
5,208	**5,338**	5,473
5,267	**5,397**	5,533
5,313	**5,444**	5,580
5,321	**5,451**	5,588

Εικόνα 9.3α: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Α100, Υ70 και Ε50.

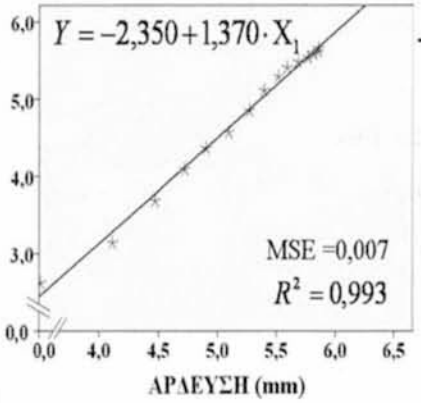
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ100



Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
	Όρια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%	
2,379	**2,499**	2,689
3,077	**3,234**	3,362
3,528	**3,700**	3,809
3,918	**4,095**	4,197
4,297	**4,456**	4,567
4,686	**4,806**	4,950
5,010	**5,104**	5,286
5,207	**5,302**	5,482
5,393	**5,488**	5,670
5,492	**5,601**	5,762
5,624	**5,737**	5,895
5,738	**5,857**	6,009
5,781	**5,923**	6,052
5,809	**5,979**	6,088
5,765	**5,988**	6,070

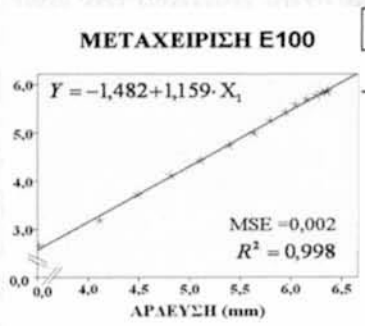
ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ50



Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
	Όρια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%	
2,245	**2,461**	2,678
3,084	**3,282**	3,481
3,580	**3,770**	3,962
3,934	**4,120**	4,309
4,183	**4,368**	4,555
4,446	**4,630**	4,816
4,684	**4,868**	5,054
4,852	**5,037**	5,224
5,016	**5,201**	5,389
5,120	**5,306**	5,495
5,244	**5,431**	5,620
5,359	**5,547**	5,737
5,423	**5,612**	5,803
5,475	**5,665**	5,857
5,483	**5,673**	5,865

Εικόνα 9.3β: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ100 και Υ50.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Όρια Εμπιστοσύνης Πρόβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
2,471	**2,588**	2,703
3,173	**3,283**	3,390
3,617	**3,723**	3,826
3,994	**4,098**	4,199
4,336	**4,440**	4,539
4,664	**4,767**	4,866
4,947	**5,049**	5,149
5,132	**5,235**	5,334
5,308	**5,412**	5,512
5,415	**5,520**	5,620
5,544	**5,649**	5,750
5,657	**5,763**	5,864
5,719	**5,825**	5,927
5,772	**5,878**	5,980
5,780	**5,886**	5,988

Εικόνα 9.3γ: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων E100.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι εξισώσεις που προέκυψαν περιγράφουν σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων ($R^2 \approx 1$). Κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή αποτελεί η άρδευση για το σύνολο των μεταχειρίσεων. Ωστόσο, στις μεταχειρίσεις Υ100 και Υ70 κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή αποτελεί και η αποθηκευμένη και άμεσα διαθέσιμη εδαφική υγρασία (X_5) ενώ για την μεταχείριση Α100 κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή αποτελεί και η υγρασία ατμόσφαιρας (X_6). Οι εξισώσεις πρόβλεψης της μεταβολής του ύψους των φυτών σε αυτές τις τρείς μεταχειρίσεις είναι:

Υ100: $Y = -0,174+1,747X_1-0,619X_5$ ($R^2 = 0,998$ και MSE = 0,003)

Υ70: $Y= -0,444+2,034X_1-0,761X_5$ ($R^2 = 0,998$ και MSE = 0,003)

Α100: $Y = -2,274+0,790X_1+0,667X_6$ ($R^2 = 0,999$ και MSE = 0,002)

Σημειώνεται ότι στις μεταχειρίσεις Υ100 και Υ70 η άρδευση και η περιεχόμενη εδαφική υγρασία (X_5) επηρεάζουν την μεταβολή του ύψους. Η προσθήκη της ανεξάρτητης μεταβλητής X_5 συμβάλει στη βελτίωση του μοντέλου (μείωση του MSE) κατά 40% στη μεταχείριση Υ100 και 25% στη μεταχείριση Υ70. Στη μεταχείριση Α100 εκτός της άρδευσης κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι και η υγρασία της ατμόσφαιρας (X_6). Η προσθήκη της ανεξάρτητης μεταβλητής X_6 συμβάλει στη βελτίωση του μοντέλου (μείωση του MSE) κατά 50%. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η άρδευση αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη του σόργου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

9.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις βιομάζας πραγματοποιούνταν την ίδια ημέρα κάθε εβδομάδας. Η εναρκτήρια μέτρηση πραγματοποιούνταν την 67η ημέρα από τη σπορά και ολοκληρώνονταν την 156η. Για τις μετρήσεις βιομάζας πραγματοποιούνταν δειγματοληψία ενός φυτού από κάθε επανάληψη. Η δειγματοληψία γινόταν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η τυχαιότητα του δείγματος χωρίς όμως να επηρεάζεται ο αριθμός φυτών στο κομμάτι της κάθε επανάληψης όπου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις ύψους και LAI. Τα φυτά συγκεντρώνονταν και στη συνέχεια γινόταν διαχωρισμός των φύλλων και των ταξιανθιών από το στέλεχος. Ακολουθούσε ζύγιση και καταγραφή του χλωρού βάρους τους πριν οδηγηθούν για ξήρανση. Η ξήρανση πραγματοποιούνταν σε ειδικό φούρνο σε θερμοκρασία 105°C για 72 ώρες και ακολουθούσε ζύγιση του ξηρού βάρους των δειγμάτων.

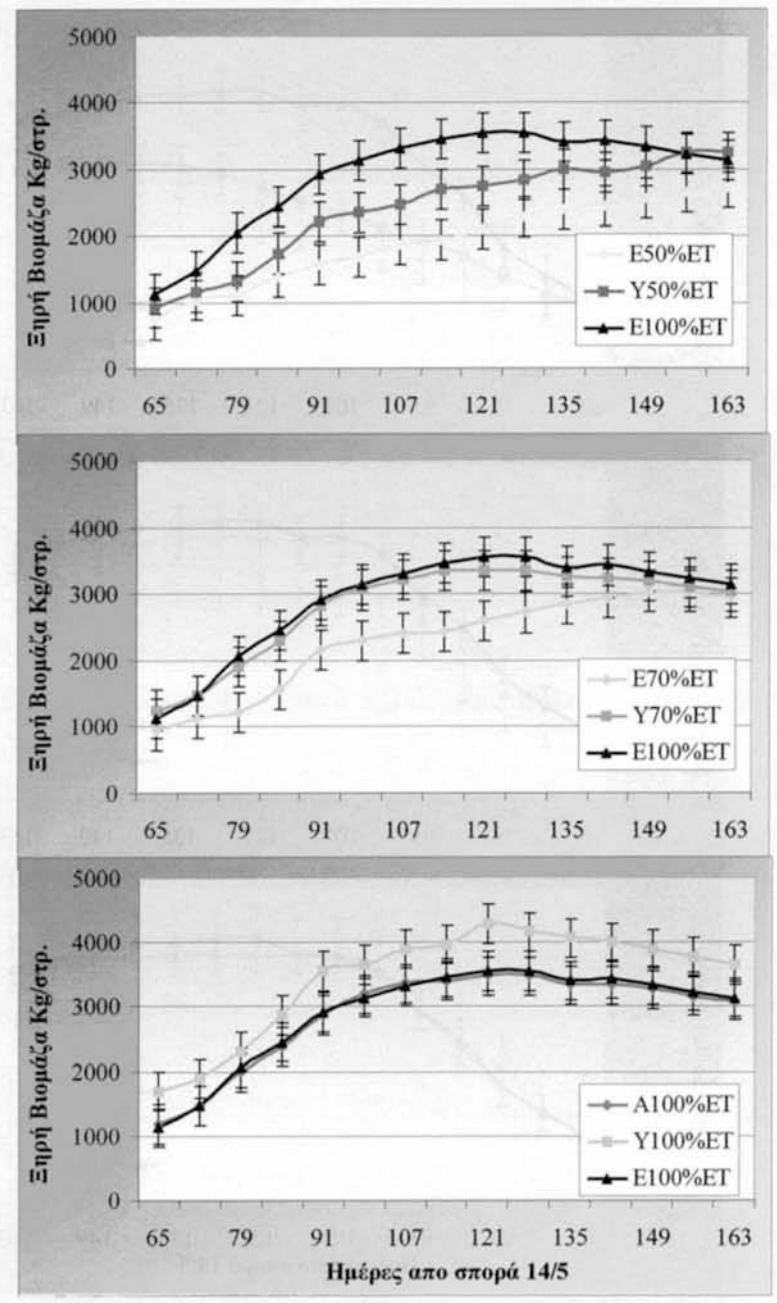
9.3.2. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς την απόδοση των φυτών σε ξηρή βιομάζα. Ο μέσος όρος παραγωγής ξηρής βιομάζας την τριετία 2007-2009 επηρεάστηκε τόσο από την δόση άρδευσης όσο και από τη μέθοδο. Η μεταχείριση που έδωσε τις μέγιστες τιμές ξηρής βιομάζας ήταν η Υ100 και παρήγαγε, κατά μέσο όρο, 28,0%, 11,7%, 14,4%, 42,5%, 28,2% και 9,2% περισσότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100, Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα. Αντίθετα η μεταχείριση που έδωσε την ελάχιστη παραγωγή ήταν η Ε50 και παρήγαγε, κατά μέσο όρο, 20,1%, 34,9%, 33,0%, 42,5%, 20,0% και 36,7% λιγότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100, Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα. Η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι οι διαφορές στην απόδοση ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν σημαντικές όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 9.2 ενώ η μεταβολή της ξηρής βιομάζας κατά τη διάρκεια των τριών καλλιεργητικών περιόδων απεικονίζεται στις Εικόνες 9.4α,β,γ.

Πίνακας 9.2: Διαφορές στην απόδοση ξηρής βιομάζας των μεταχειρίσεων την τριετία 2007-2009 μετά την στατιστική ανάλυση.

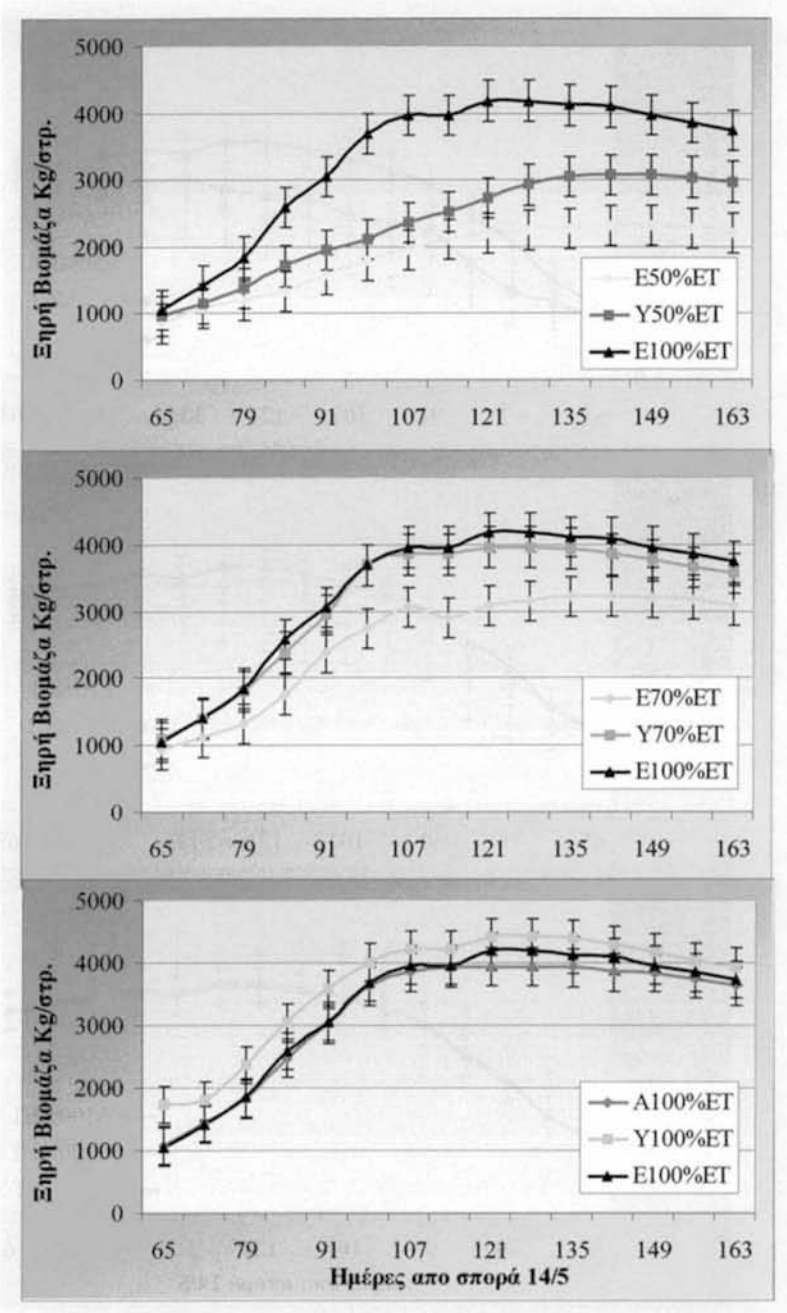
	ΕΤΟΣ	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Υ50	Υ70	Υ100
Παραγωγή	2007	3478b	2718c	3038bc	3553b	3259bc	3357b	4287a
Ξηρής Βιομάζας	2008	3937a	2318c	3218b	4185a	3083b	3960a	4410a
(Kg/στρ.)	2009	4000ab	2375d	3025bcd	3975ab	2925bcd	3750abc	4200a
CV=6,59%	M.O.	3798ab	2471c	3094bc	3904a	3089bc	3681ab	4299a

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



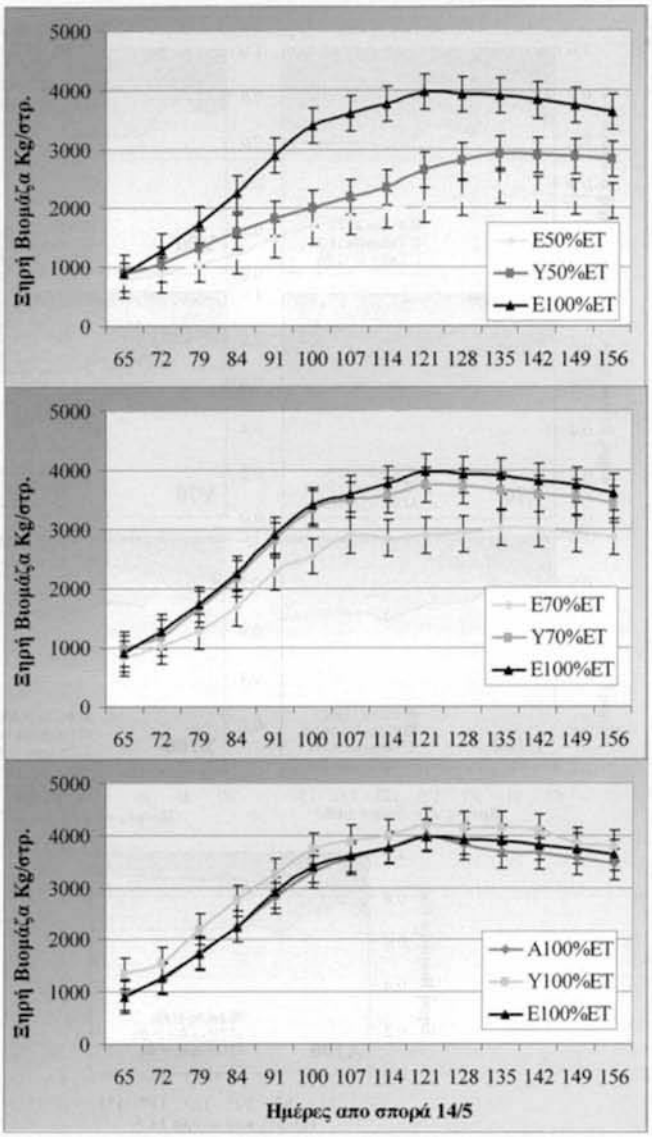
Εικόνα 9.4α: Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2007.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 9.4β: Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2008.

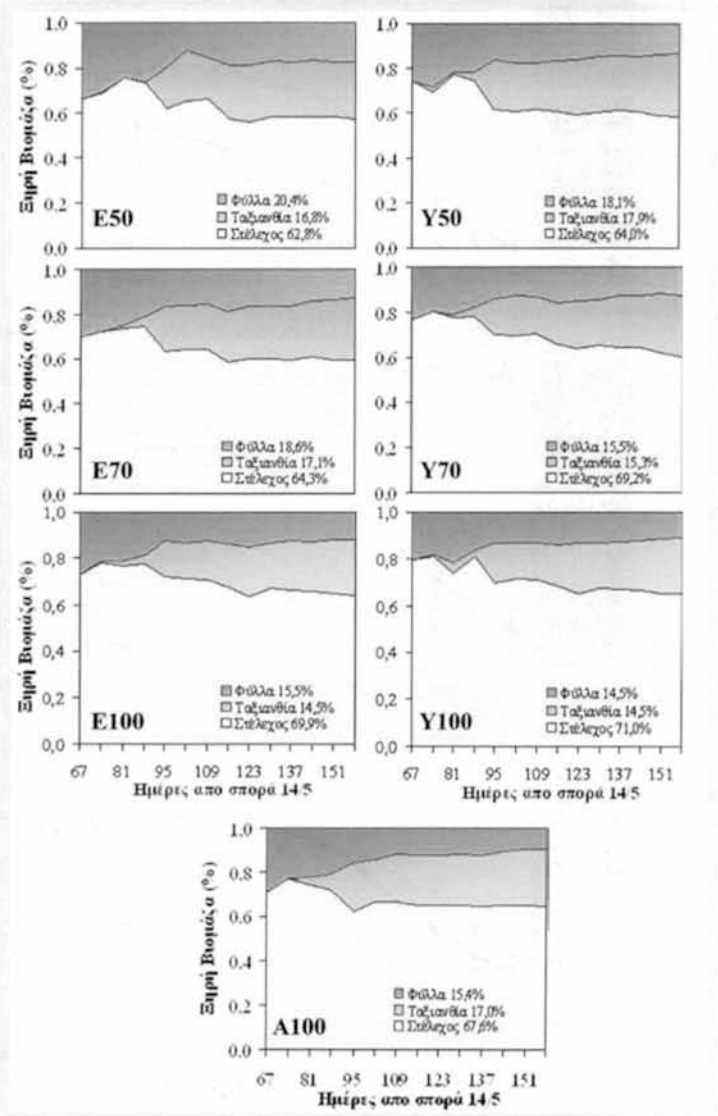
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 9.4γ: Τιμές της ξηρής βιομάζας όπως μετρηθήκαν το έτος 2009.

Η γενική τάση που παρατηρήθηκε ήταν ο μέσος όρος της παραγωγής ξηρής βιομάζας στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση να είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν με επιφανειακή στάγδην άρδευση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



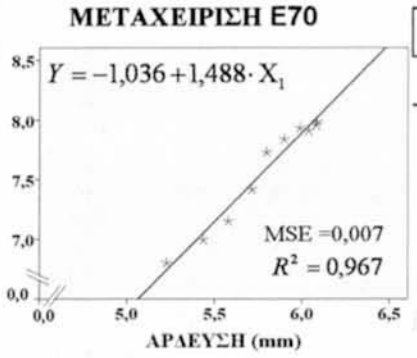
Εικόνα 9.5: Συμβολή των μερών του φυτού στην ξηρή βιομάζα.

Στην Εικόνα 9.5 απεικονίζεται συμβολή των μερών του φυτού στην ξηρή βιομάζα. Από την εικόνα φαίνεται ότι το 67% περίπου της ξηρής βιομάζας προέρχονταν από τα στελέχη του φυτού, το 17% από τα φύλλα και το 16% από τις ταξιανθίες.

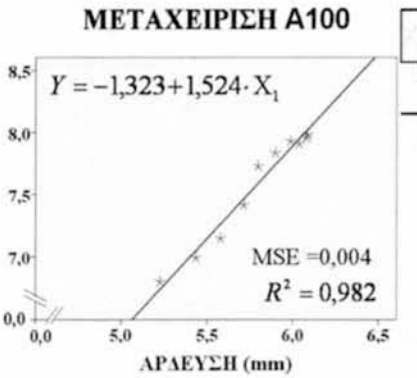
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε η εξίσωση πρόβλεψης της παραγωγής βιομάζας για κάθε μεταχείριση. Η τελική εξίσωση πρόβλεψης προέκυψε από τις μέσες τιμές των παραμέτρων και των τριών ετών της έρευνας. Η ξηρή βιομάζα αποτελούσε την εξαρτημένη μεταβλητή (Y) ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν οι ίδιες που αναφέρονται στην παράγραφο 9.2.3. Η γραμμικοποίηση έγινε με την εφαρμογή λογαριθμοποίησης με βάση το φυσικό λογάριθμο (ln) σε όλες τις τιμές των μεταβλητών. Στις Εικόνες 9.6, 9.7α και 9.7β φαίνονται οι εξισώσεις πρόβλεψης της τιμής της ξηρής βιομάζας, η γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών της, τα όρια εμπιστοσύνης για κάθε τιμή, ο πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error, MSE).



Όρια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,500	**6,742**	6,985
6,830	**7,051**	7,274
7,052	**7,264**	7,478
7,259	**7,467**	7,676
7,384	**7,591**	7,800
7,532	**7,741**	7,951
7,662	**7,874**	8,087
7,735	**7,949**	8,165
7,794	**8,012**	8,230
7,803	**8,020**	8,240

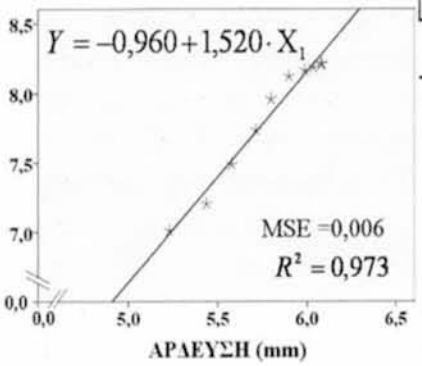


Όρια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,750	**6,940**	7,126
7,185	**7,355**	7,520
7,335	**7,500**	7,661
7,625	**7,786**	7,942
7,777	**7,938**	8,094
7,874	**8,036**	8,193
7,987	**8,152**	8,311
8,037	**8,202**	8,363
8,106	**8,274**	8,436
8,143	**8,312**	8,475

Εικόνα 9.6: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Ε70 και Α100.

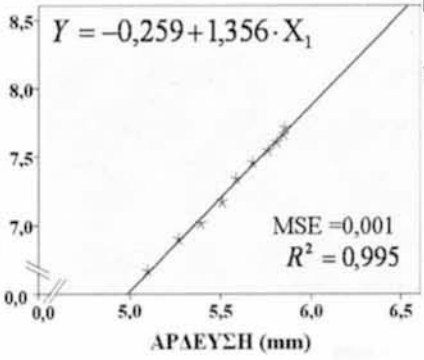
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ70



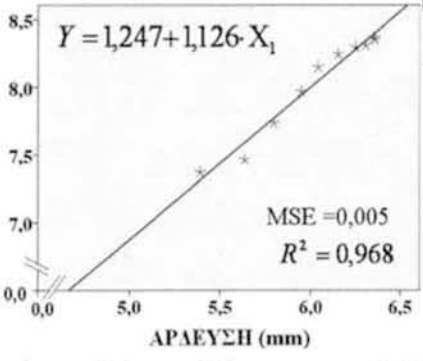
Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,770	**6,990**	7,208
7,103	**7,305**	7,504
7,325	**7,519**	7,710
7,534	**7,724**	7,911
7,663	**7,852**	8,038
7,813	**8,004**	8,192
7,946	**8,140**	8,331
8,018	**8,214**	8,408
8,079	**8,277**	8,473
8,088	**8,286**	8,483

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Ε50



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,575	**6,650**	6,727
6,816	**6,885**	6,957
6,984	**7,050**	7,118
7,146	**7,211**	7,278
7,250	**7,314**	7,381
7,372	**7,437**	7,504
7,486	**7,552**	7,620
7,550	**7,617**	7,686
7,601	**7,669**	7,739
7,609	**7,677**	7,747

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ100

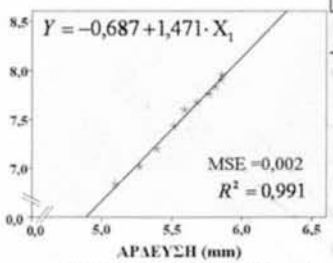


Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
7,114	**7,318**	7,519
7,406	**7,592**	7,775
7,595	**7,773**	7,948
7,769	**7,944**	8,115
7,874	**8,048**	8,219
7,997	**8,173**	8,345
8,104	**8,282**	8,457
8,163	**8,344**	8,521
8,212	**8,395**	8,574
8,220	**8,403**	8,583

Εικόνα 9.7α: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ70, Ε50 και Υ100.

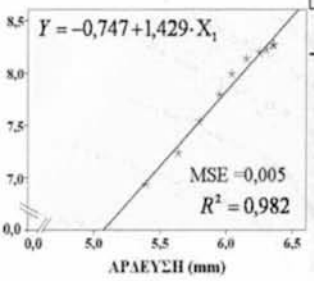
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Υ50



Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,695	**6,807**	6,915
6,960	**7,063**	7,162
7,145	**7,244**	7,339
7,324	**7,421**	7,513
7,437	**7,533**	7,626
7,570	**7,667**	7,760
7,693	**7,792**	7,886
7,761	**7,861**	7,957
7,817	**7,918**	8,016
7,825	**7,927**	8,025

ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗ Ε100



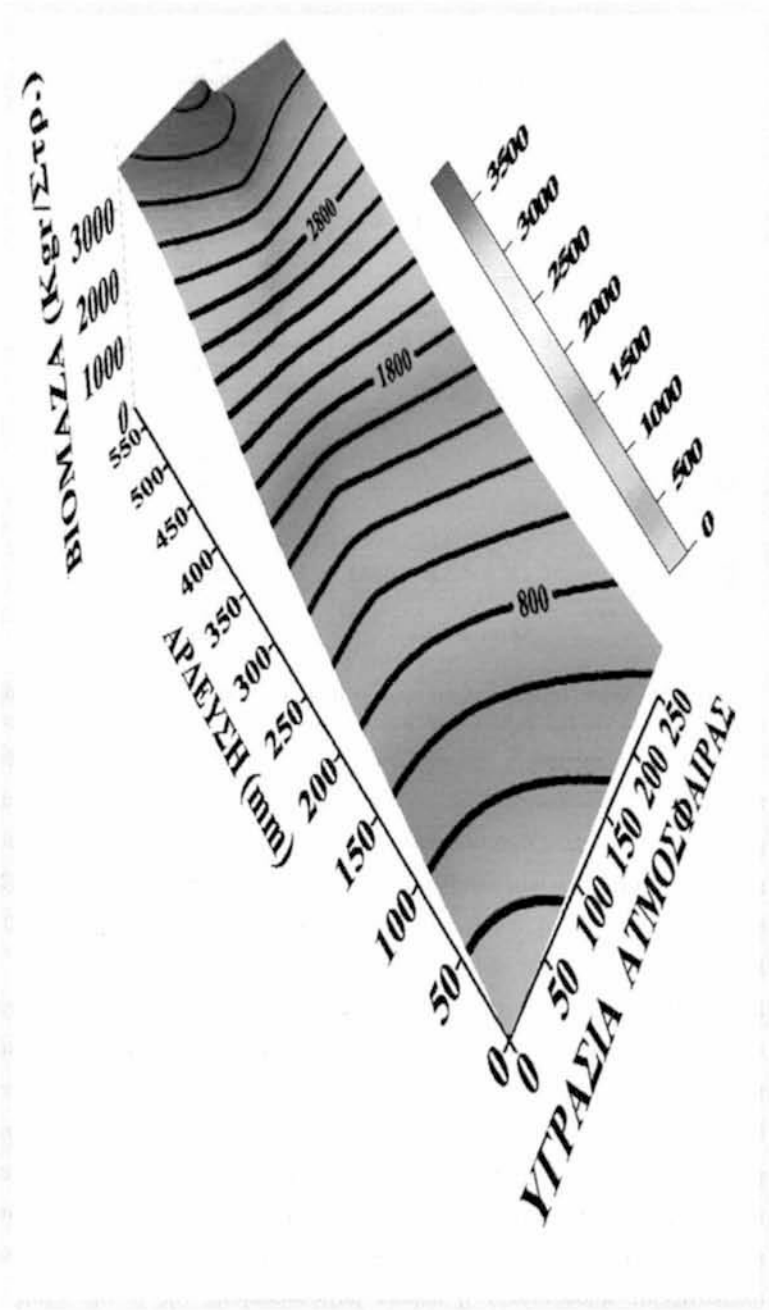
Ορια Εμπιστοσύνης Προβλεψης για Πιθανότητα 95%		
Κατώτερη Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή	Ανώτερη Τιμή
6,844	**6,958**	7,006
7,179	**7,306**	7,327
7,466	**7,535**	7,601
7,741	**7,753**	7,877
7,919	**7,886**	8,071
8,045	**8,045**	8,182
8,091	**8,185**	8,234
8,167	**8,262**	8,302
8,238	**8,327**	8,375
8,173	**8,338**	8,329

Εικόνα 9.7β: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στους μέσους όρους της τριετίας όλων των παραμέτρων των μεταχειρίσεων Υ50 και Ε100.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι εξισώσεις που προέκυψαν περιγράφουν πάνω από το 95% των περιπτώσεων (R^2>0,95). Κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή αποτελεί η άρδευση για το σύνολο των μεταχειρίσεων. Ωστόσο, στη μεταχείριση Ε100 κρίσιμη μεταβλητή αποτελεί και η υγρασία ατμόσφαιρας (X_6). Η εξίσωση πρόβλεψης της παραγωγής ξηρής βιομάζας για τη μεταχείριση Ε100 είναι: Ε100: $Y = 0,250+2,905X_1-2,186X_6$ (R^2 = 0,993 και MSE = 0,002).

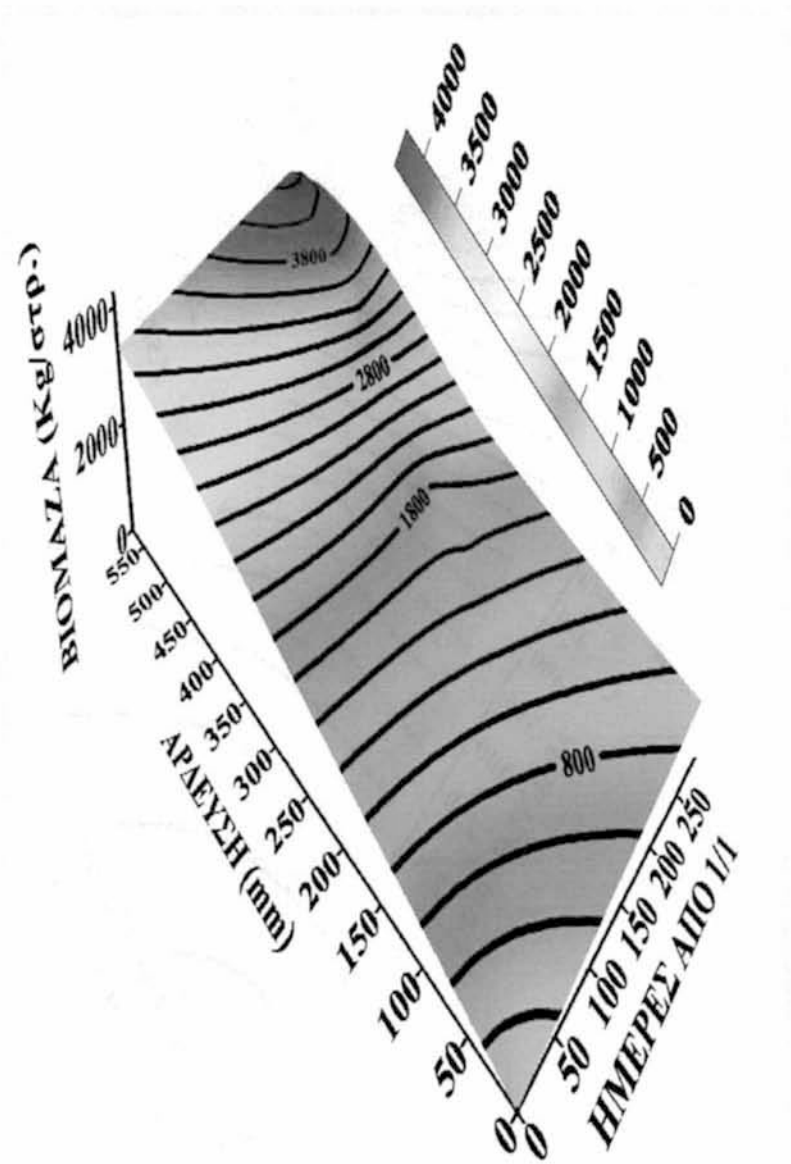
Η προσθήκη της ανεξάρτητης μεταβλητής X_6 συμβάλει στη βελτίωση του μοντέλου κατά 60%. Επιβεβαιώνεται δηλαδή η άποψη ότι η απόδοση των φυτών, όπως και του σόργου, αυξάνεται όσο αυξάνεται η άρδευση και επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος. Ειδικά για το σόργο φαίνεται ότι υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών η απόδοση σε βιομάζα μεγιστοποιείται όταν μεγιστοποιείται η ποσότητα άρδευσης δεδομένου ότι οι κλιματικές συνθήκες δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη και απόδοση του. Στις Εικόνες 9.8α-9.8ζ απεικονίζεται τρισδιάστατα η πορεία μεγιστοποίησης της μέσης τιμής ξηρής βιομάζας για την τριετία 2007-2009 και για κάθε μεταχείριση χωριστά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



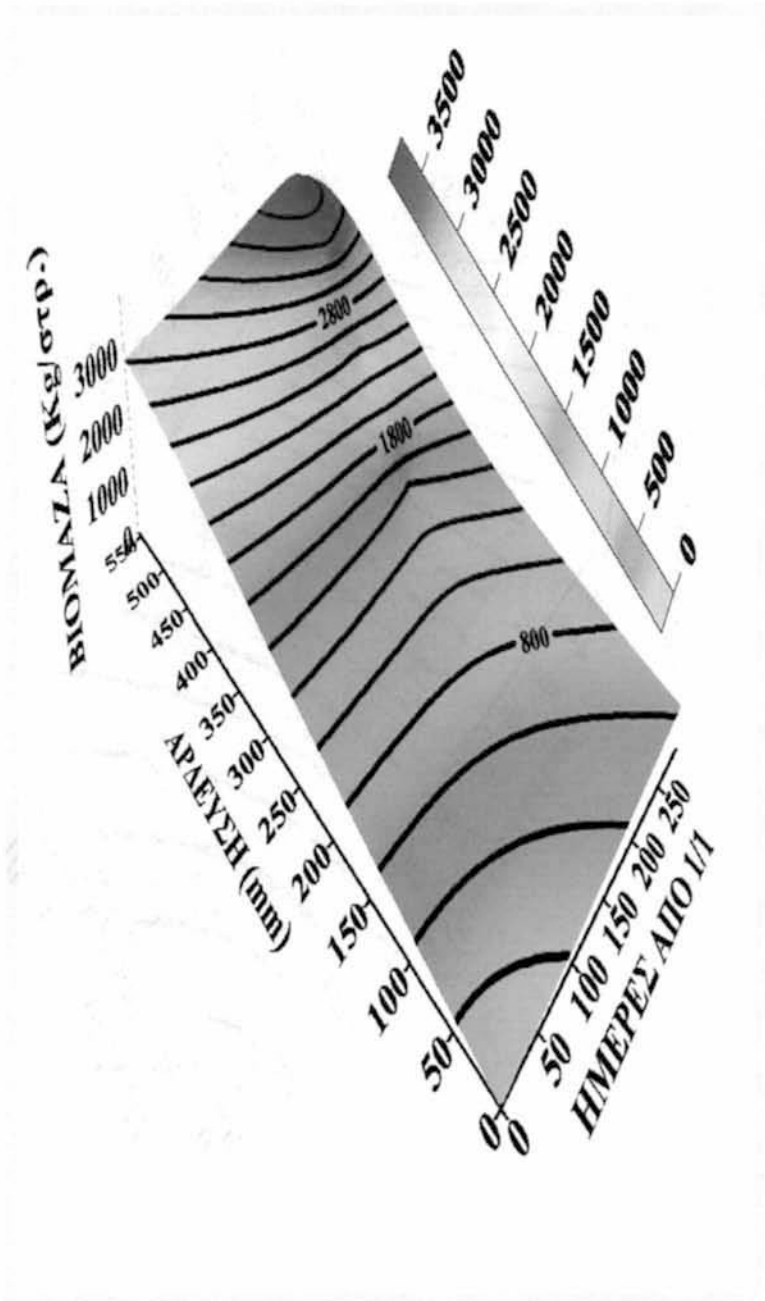
Εικόνα 9.8α: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε100.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



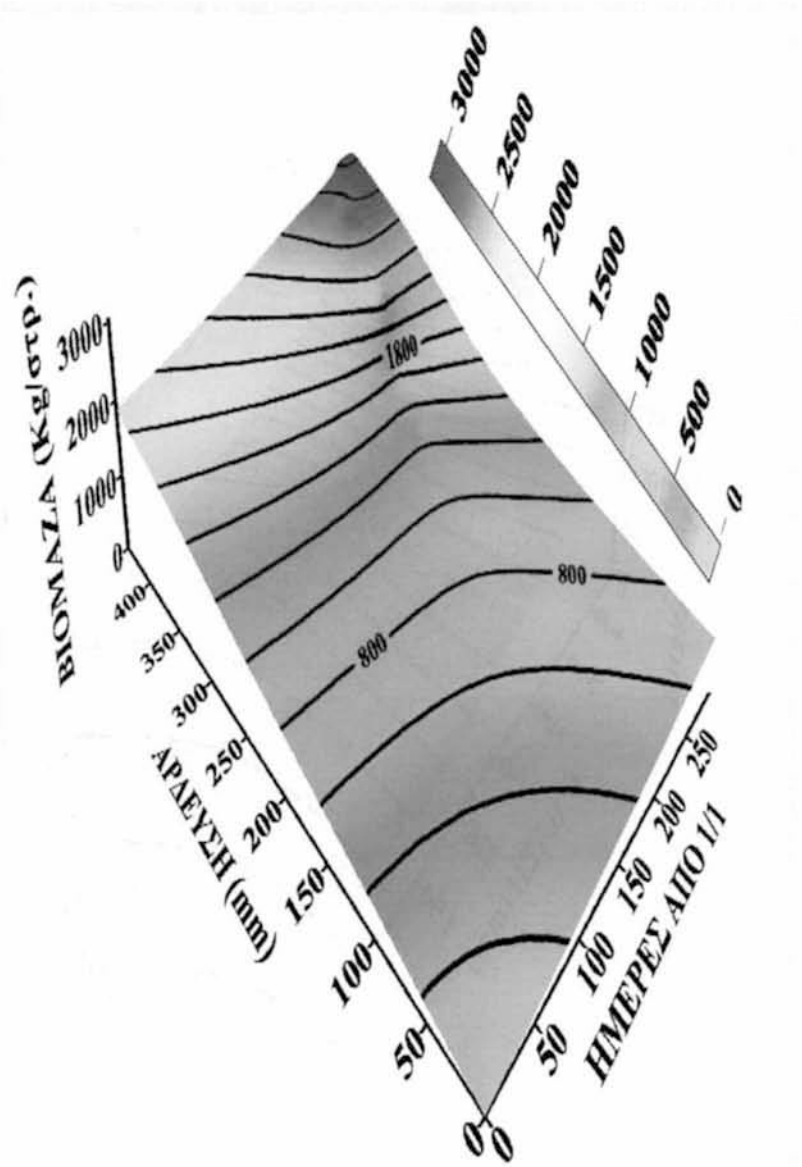
Εικόνα 9.8β: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ100.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



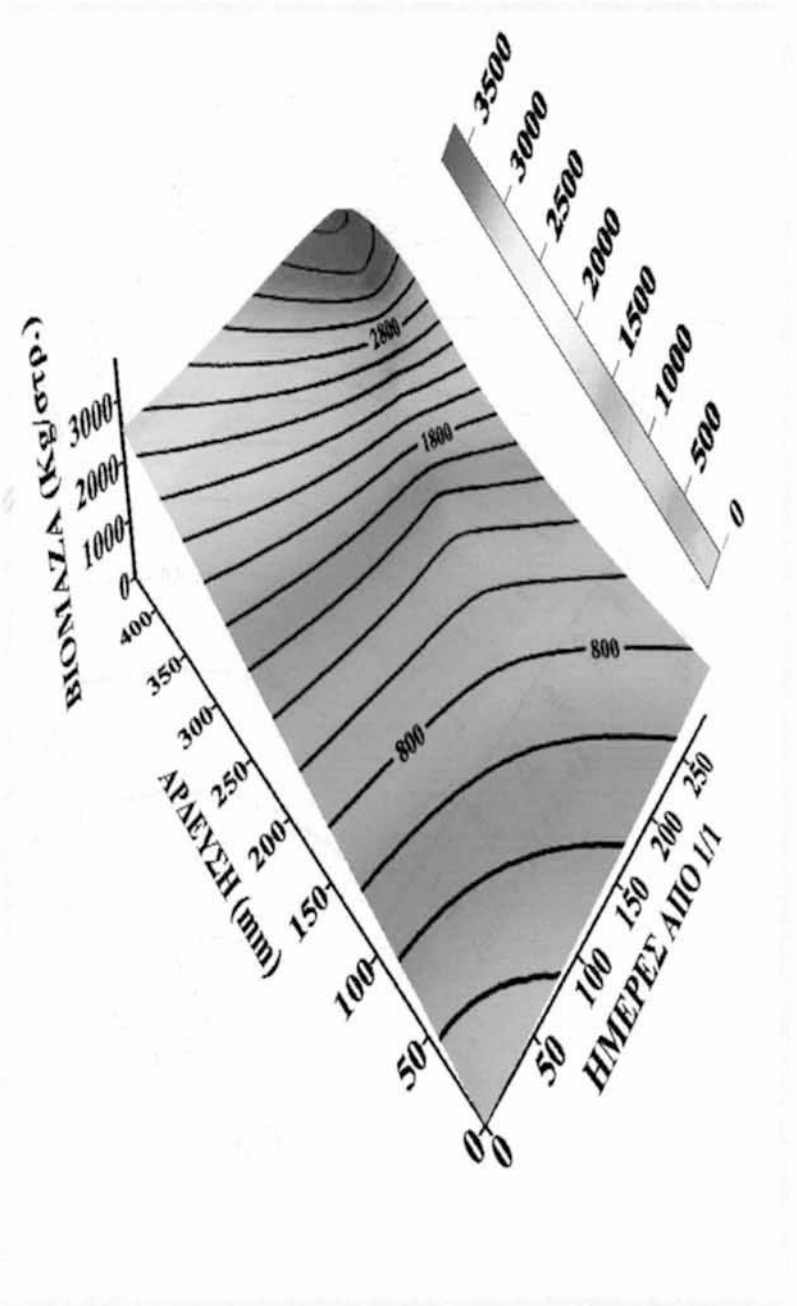
Εικόνα 9.8γ: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Α100.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



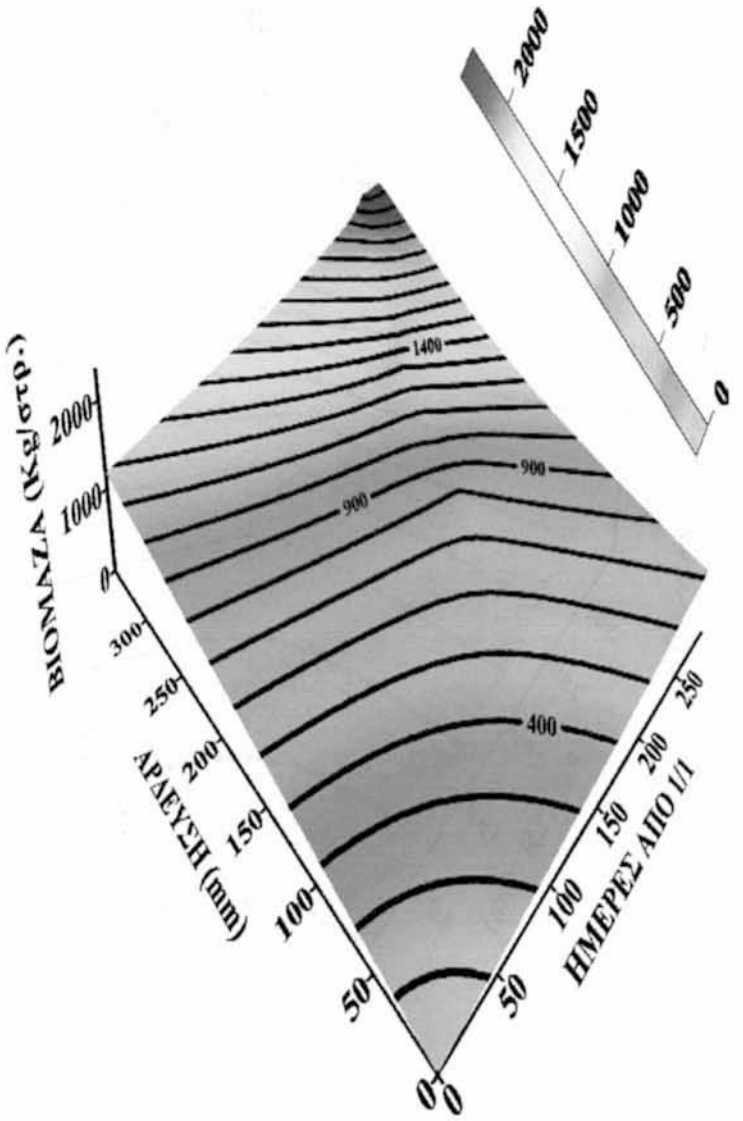
Εικόνα 9.8δ: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε70.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



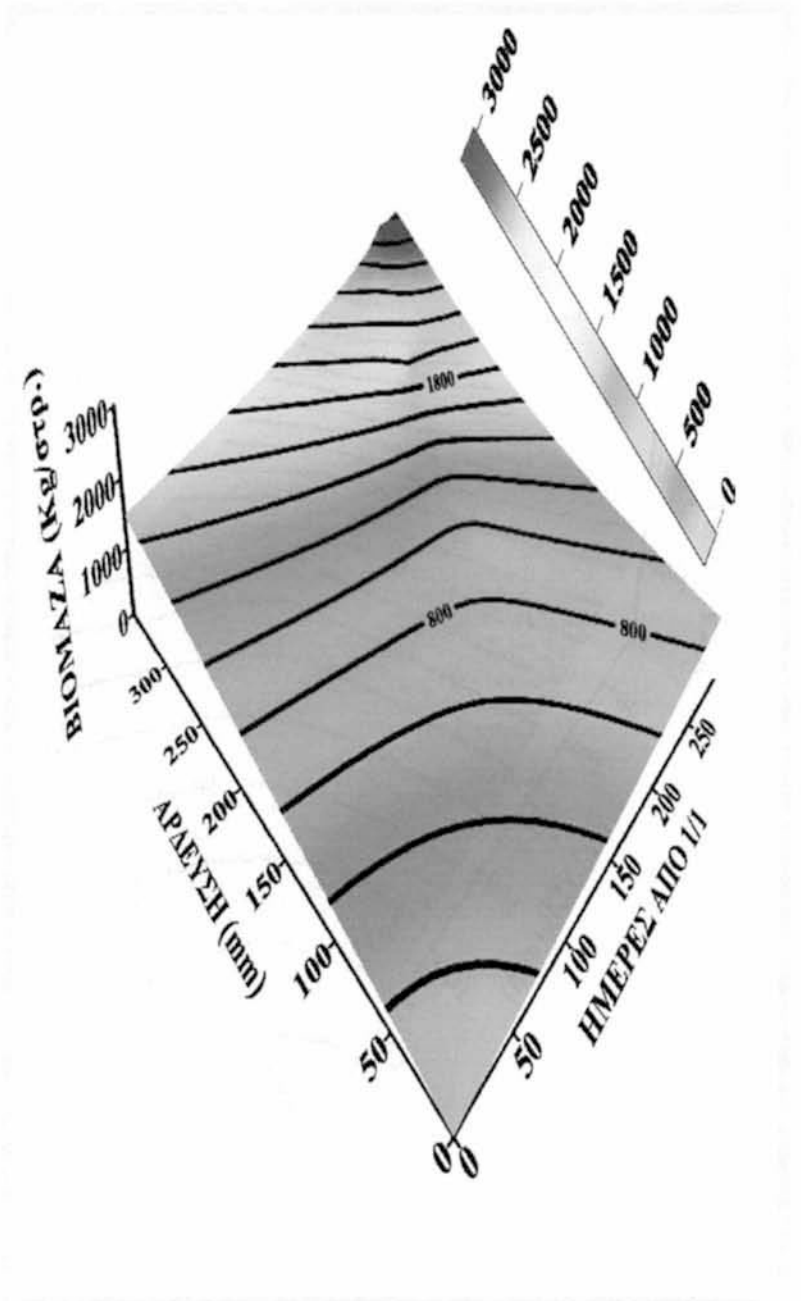
Εικόνα 9.8ε: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ70.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



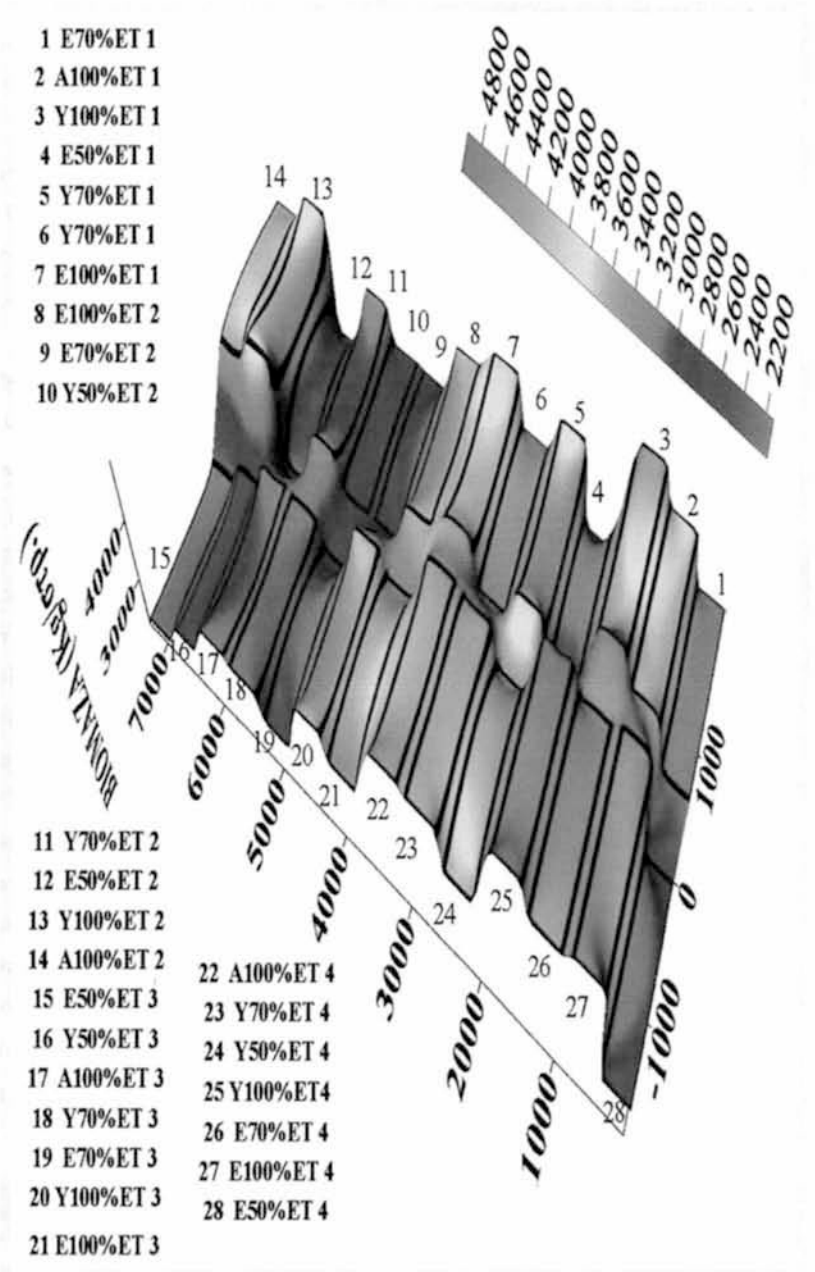
Εικόνα 9.8στ: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Ε50.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 9.8ζ: Η πορεία μεγιστοποίησης της ξηρής βιομάζας στη μεταχείριση Υ50.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31



Εικόνα 9.9: Απεικόνιση της διακύμανσης της παραγωγής ξηρής βιομάζας των 7 μεταχειρίσεων στον αγρό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.3.4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για την μετατροπή της παραγόμενης βιομάζας σε ενέργεια αναφέρονται διάφορες μέθοδοι στη βιβλιογραφία. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μετατροπής βιομάζας σε ενέργεια είναι:

- του El Bassam (1998), ο οποίος χρησιμοποιεί την εξίσωση
$$E = \Sigma M \times B \quad (9.1)$$
όπου E είναι η παραγόμενη ενέργεια εκφρασμένη σε MJ, B είναι η ετήσια παραγωγή βιομάζας εκφρασμένη σε Kg/ha και ΣM=17,5 είναι ένας συντελεστής μετατροπής εκφρασμένος σε MJ/Kg,
- των Monti and Venturi, (2003), οι οποίοι χρησιμοποιούν την εξίσωση:
$$E = \Sigma M_1 \cdot B_1 + \Sigma M_2 \cdot G + \Sigma M_3 \cdot B_2 \quad (9.2)$$
όπου E είναι η παραγόμενη ενέργεια εκφρασμένη σε MJ, B_1 είναι η ετήσια παραγωγή βιομάζας από τα φύλλα και το στέλεχος του φυτού εκφρασμένη σε Kg/ha και ΣM_1=16,0 είναι ο αντίστοιχος συντελεστής μετατροπής εκφρασμένος σε MJ/Kg (Bonari et al., 1996), G είναι η βιομάζα που προέρχεται από το σπόρο (grain) και ΣM_2 είναι ο αντίστοιχος συντελεστής μετατροπής εκφρασμένος σε MJ/Kg (Southwell and Rothwell, 1977), B_2 είναι η βιομάζα που προέρχεται από τα υπολείμματα της καλλιέργειας και ΣM_3 είναι ο αντίστοιχος συντελεστής μετατροπής εκφρασμένος σε MJ/Kg (Ivarsson and Nilsson, 1988).

Στην παρούσα έρευνα για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος. Η επιλογή έγινε διότι για την μέτρηση της βιομάζας κόβονταν και ζυγίζονταν ολόκληρο φυτό (φύλλα, στέλεχος, ταξιανθία). Επειδή οι κοπές των μεμονωμένων φυτών γινόταν χειρονακτικά θεωρήθηκε ότι η ενέργεια από τα τυχόν υπολείμματα που θα προέκυπταν από τη μηχανική συλλογή ενσωματώνονταν στην συνολική ενέργεια που παράγονταν από το υπόλοιπο φυτό. Στον παρακάτω Πίνακα 9.3 φαίνεται η παραγωγή ενέργειας κάθε μεταχείρισης για κάθε έτος και ο μέσος όρος της τριετίας.

Πίνακας 9.3: Παραγωγή ενέργειας από ξηρή βιομάζα την τριετία 2007-2009.

	ΕΤΟΣ	A100	E50	E70	E100	Y50	Y70	Y100
Παραγωγή Ενέργειας (GJ/στρ.)	2007	168b	131c	147c	172b	157bc	162b	207a
	2008	190a	112c	155b	202a	149b	191a	213a
	2009	193ab	115d	146bcd	192ab	141cd	181ab	203a
	M.O.	183,4ab	119,3c	149,4bc	188,6a	149,2bc	177,8ab	207,7a

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Επίσης παρατηρήθηκε η τάση τα ζεύγη των μεταχειρίσεων Υ70-Ε100 και Υ50-Ε70 να δίνουν παρόμοια παραγωγή ενέργειας ως αποτέλεσμα και της παρόμοιας παραγωγής βιομάζας. Το γεγονός αυτό δείχνει για ακόμη μια φορά ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Η μεταχείριση που έδωσε την μέγιστη παραγωγή ενέργειας ήταν η Υ100 η οποία παρήγαγε, κατά μέσο όρο, 28,0%, 11,7%, 14,4%, 42,5%, 28,2% και 9,2% περισσότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100, Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα. Αντίθετα η μεταχείριση που έδωσε την ελάχιστη παραγωγή ήταν η Ε50 και παρήγαγε, κατά μέσο όρο, 20,1%, 34,9%, 33,0%, 42,5%, 20,0% και 36,7% λιγότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100, Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα.

9.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

9.4.1. ΥΨΟΣ ΦΥΤΟΥ

Κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ανάπτυξη των φυτών. Τα φυτά που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση ήταν ψηλότερα σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκα με επιφανειακή. Αντίστοιχα, τα φυτά που αρδεύτηκαν πλήρως παρουσίασαν μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Η μέση μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ100 όπου τα φυτά έφτασαν σε ύψος 385cm ενώ η μέση ελάχιστη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Ε50, στην οποία τα φυτά έφτασαν σε ύψος τα 250cm. Αντίστοιχες μέγιστες τιμές ύψους φυτού αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Dercas and Liakatas, 1999, Quaranta et al., 2000, Sakellariou et al., 2005e, 2006b, 2007a). Στις πλήρως αρδευόμενες μεταχειρίσεις τα φυτά φτάνουν το μέγιστο ύψος περίπου στις 110 ημέρες από τη σπορά ενώ στις ελλειμματικά αρδευόμενες περίπου 2 εβδομάδες αργότερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τάση που έχει το σόργο να μειώνει τους ρυθμούς ανάπτυξής του όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς (έλλειψη νερού) και να επανέρχεται σε κανονικούς ρυθμούς μετά την αποκατάσταση ευνοϊκών συνθηκών (μειωμένη ΕΤ το μήνα Σεπτέμβριο παράλληλα με αύξηση των βροχοπτώσεων). Επομένως, καθίσταται σαφές ότι εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την ανάπτυξη του φυτού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

9.4.2. ΒΙΟΜΑΖΑ ΦΥΤΟΥ

Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν στην ανάπτυξη των φυτών αντικατοπτρίστηκαν και στην παραγωγή ξηρής βιομάζας.

Η μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης και δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης. Η μέση μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ100 (≈4300Kg/στρ.). Οι Curt et al. (1995) αναφέρουν απόδοση ξηρής βιομάζας μεταξύ 1600-4000Kg/στρ. στην Κεντρική Ισπανία σε καλλιέργεια γλυκού σόργου ενώ δεν γίνεται αναφορά σε αποδόσεις με τη χρήση υπόγειας στάγδην άρδευσης και δόσης άρδευσης ίσης με την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή. Η μεγάλη απόδοση σε ξηρή βιομάζα που παρατηρήθηκε στην συγκεκριμένη μεταχείριση κυρίως οφείλεται στην δόση άρδευσης αλλά και στις μειωμένες απώλειες από εξάτμιση και επιφανειακή απορροή. Παράλληλα, η δυνατότητα του φυτού να εκμεταλλεύεται τις χορηγούμενες ποσότητες νερού αποδοτικά είχε σαν αποτέλεσμα οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης να ελαχιστοποιούνται αλλά και να χρησιμοποιείται αποδοτικότερα νερό που αποθηκεύονταν σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους (κάτω από τα 60cm). Ο μέσος όρος παραγωγής των μεταχειρίσεων Ε100, Α100 και Υ70 κυμάνθηκε μεταξύ 3700 και 3900Kg/στρ. Αντίστοιχες αποδόσεις αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Mastrorilli et al. 1995, Quaranta et al., 2000, Turgut et al., 2005, Sakellariou et al., 2005e, 2006b, 2007a, 2009a,b).

Η ελάχιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις Ε70, Υ50 και Ε50. Η μέση ελάχιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Ε50 (≈2470Kg/στρ.). Οι Dercas and Liakatas, (2006) αναφέρουν παραγωγή μεγαλύτερη από 2000Kg/στρ. όταν εφαρμόστηκε δόση άρδευσης περίπου 45% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας οι συγκεκριμένες μεταχειρίσεις έδωσαν ικανοποιητική απόδοση κυρίως λόγω της ικανότητας του σόργου να εισέρχεται σε κατάσταση μειωμένης διαπνοής ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις ανάγκες του σε νερό. Αυτό είχε ως συνέπεια η μέγιστη τιμή βιομάζας σε αυτές τις μεταχειρίσεις να παρατηρείται περίπου 15-20 ημέρες αργότερα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, οι οποίες παρουσίαζαν μέγιστη παραγωγή περίπου το δεύτερο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου (120-130 ημέρες από τη σπορά). Επομένως, καθίσταται σαφές ότι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την παραγωγή βιομάζας.

Ειδικά στις μεταχειρίσεις Ε100 και Α100 δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά τη διετία 2008-2009 όταν και εφαρμόστηκε πλήρως η αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση.

Τέλος τα μέρη του φυτού, στελέχη, φύλλα, ταξιανθίες, συνέβαλαν σε ποσοστό 67, 17, και 16% αντίστοιχα. Οι Monti and Venturi (2003) αναφέρουν αντίστοιχες τιμές από έρευνα που πραγματοποίησαν στην Ιταλία σε καλλιέργεια ινώδους σόργου.

9.4.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διαφορετική παραγωγή βιομάζας είχε ως αποτέλεσμα την διαφορετική παραγωγή ενέργειας.

Πίνακας 9.4: Ενεργειακό ισοζύγιο των μεταχειρίσεων την τριετία 2007-2009

Καλ/κές Εργασίες Αριθ. Επερβάσεων	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Υ50	Υ70	Υ100	Τιμή Μονάδος	Αναφορές
Καλλιερ/κές Εργασίες	316	316	316	316	316	316	316	182 MJ/στρ.	Nagy, 1999 Monti et al., 2003
Σπορά	6	6	6	6	6	6	6	62MJ/στρ.	Τσατσαρέλης, 2006
Σπόρος (0,7Kgr/στρ.)	35	35	35	35	35	35	35	54 MJ/Kgr	Monti et al., 2003
Ζιζαν/νία (1)	4	4	4	4	4	4	4	42 MJ/στρ.	Τσατσαρέλης, 2006
Ζιζανιοκτόνο (0,2 L/στρ.)	50	50	50	50	50	50	50	25 MJ/στρ./L	Nagy, 1999
Συγκομιδή (1)	17,5	11,5	14,2	18,0	14,3	17,0	19,8	2,5-6,7 MJ/τόνο	Τσατσαρέλης, 2006
Χορτ/λογή Δεμ/ση (1)	20,3	13,4	16,6	20,9	16,6	19,8	23,0	4,0-6,7 MJ/τόνο	Τσατσαρέλης, 2006
Μεταφορά (έως 60Km)	2102,2	1383	1714	2157,5	1714,9	2046,8	2378,8	9,22 MJ/τόνο/Km	Acaroğlu et al., 2005
Μπρικ/ση	3797,7	2470,7	3093,5	3904,2	3088,7	3681,3	4299,2	1,0 MJ/Kgr	Acaroğlu et al., 2005
Εργασία	1137	965	1063	1137	965	1063	1137	1,87 MJ/h	Acaroğlu et al., 2005
Άρδευση (mm)	2831,9	1851,2	2354,6	3080,5	1877,0	2349,7	3074,3	4,9 MJ/mm	Pimentel, 2003
Σύνολο Καταν/νης Ενέργειας	10318	7106	8667	10729	8088	9589	11343	MJ/στρ.	
Παρ/γή Ενέργειας	183429	119335	149416	188573	149184	177807	207651	48,3MJ/Kg	El Bassam, 1998
Ισοζύγιο	17,8	16,8	17,2	17,6	18,5	18,5	18,3		

Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στην μεταχείριση Υ100 και η ελάχιστη στην Ε50. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναλογία εισροών/εκροών ενέργειας στην κάθε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μεταχείριση. Στον παραπάνω Πίνακα 9.4 φαίνεται το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται για τις καλλιεργητικές εργασίες, τη συγκομιδή και μεταφορά της βιομάζας, την άρδευση, την παραγωγή συμπιεσμένων τεμαχίων πεπιεσμένης βιομάζας διαστάσεων 10x20cm (briquettes).

Σημειώνεται ότι οι τιμές στον Πίνακα 9.4 προκύπτουν από τις αντίστοιχες μοναδιαίες τιμές καταναλισκόμενης ενέργειας για κάθε εργασία, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία για βαριά εδάφη, πολλαπλασιασμένες με τις αντίστοιχες ποσότητες που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της έρευνας. Η καταναλισκόμενη ενέργεια για άρδευση υπολογίστηκε για το σύνολο της ποσότητας νερού που χορηγήθηκε σε κάθε μεταχείριση (καταιονισμός και στάγδην άρδευση) και για μέσο βάθος άντλησης τα 250m.

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό για το σύνολο των μεταχειρίσεων. Οι Venturi and Venturi, (2003) αναφέρουν ότι όλα τα δημητριακά έχουν θετικό ενεργειακό ισοζύγιο και ότι το γλυκό σόργο έχει αναλογία εκροών εισροών ενέργειας 9,6 όταν καλλιεργείται υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών. Οι Monti and Venturi, (2003) αναφέρουν ότι για το ινώδες σόργο η αναλογία εκροών εισροών ενέργειας κυμαίνετε μεταξύ 15-20. Μια τάση υπεροχής φαίνεται να παρουσιάζει η μεταχείριση Y70 η οποία δίνει μεγαλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο κατά 4,1%, 9,0%, 7,0%, 5,2%, 0,5% και 1,3% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις A100, E50, E70, E100, Y50 και Y100 αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι μεταχειρίσεις που έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή βιομάζας δεν παρουσίασαν αντίστοιχα και μεγαλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο. Η ενέργεια που εξοικονομείται λόγω της μειωμένης δόσης άρδευσης και η σημαντική παραγωγή βιομάζας που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Y70 ήταν οι δύο παράγοντες που επέδρασαν θετικά στη διαμόρφωση του υψηλού ενεργειακού ισοζυγίου στη συγκεκριμένη μεταχείριση. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταχείριση E50 στην οποία το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό και αρκετά υψηλό παρόλο που οι ανάγκες της καλλιέργειας καλύφθηκαν μόνο κατά το 50%.

Από τον ίδιο πίνακα προκύπτει ότι η περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται κυρίως για τη μεταφορά και τη μεταποίηση της βιομάζας σε μπριγκέτες και δευτερευόντως για την άρδευση. Ειδικότερα, εξετάζοντας την άρδευση (καταιονισμός και στάγδην άρδευση) ως προς την κατανάλωση ενέργειας προκύπτει ότι αυτή αποτελεί ποσοστό 27,4%, 26,1%, 27,2%, 28,7%, 23,2%, 24,5%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και 27,1% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας στις μεταχειρίσεις A100, E50, E70, E100, Y50, Y70 και Y100 αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι μείωση της ποσότητας στάγδην άρδευσης κατά 50% (μεταχειρίσεις E50 και Y50) συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας για άρδευση σε ποσοστό 37,9% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις A100, E100 και Y100 (μέσες τιμές). Αντίστοιχα, μείωση της άρδευσης κατά 30% (μεταχειρίσεις E70 και Y70) συμβάλει σε εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 21,5% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις A100, E100 και Y100 (μέσες τιμές). Ειδικότερα, η πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση (μεταχείριση A100) εξοικονομεί ενέργεια σε ποσοστό 8,0% σε σύγκριση με τη μέση ενέργεια που καταναλώθηκε στις μεταχειρίσεις E100 και Y100. Επομένως, καθίσταται σαφές ότι εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την παραγωγή και εξοικονόμηση ενέργειας ενώ εφαρμογή συστημάτων πλήρους αυτοματοποίησης της άρδευσης συμβάλουν και στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^{ο}

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Δ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

10.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η επίδραση της μεθόδου στάγδην άρδευσης (επιφανειακής και υπόγειας) και της δόσης άρδευσης στην οικονομικότητα της καλλιέργειας του φυτού σόργου. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η ακαθάριστη πρόσοδος, οι άμεσες δαπάνες, το άμεσο κόστος ανα μονάδα παραγόμενου προϊόντος, το άμεσο κόστος ανά μονάδα νερού που εφαρμόστηκε και το ακαθάριστο κέρδος.

10.2. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ

10.2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η οικονομική επιστήμη ασχολείται με τις καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου. Στην καθημερινότητά του ο κάθε άνθρωπος καλείται να λάβει αποφάσεις όπως είναι η κατανάλωση, η επένδυση και η αποταμίευση. Έτσι, η οικονομική επιστήμη παρέχει τα κριτήρια, στα οποία θα στηριχθεί ο άνθρωπος για να λάβει την κατάλληλη εναλλακτική απόφαση. Ουσιαστικά, η οικονομική επιστήμη παρέχει στον άνθρωπο την μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατή η σύγκριση των αναμενόμενων ωφελειών και των πραγματοποιούμενων δαπανών (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

Η αγροτική οικονομική είναι ένας εφαρμοσμένος κλάδος των γεωπονικών και οικονομικών επιστημών. Η οικονομική της παραγωγής γεωργικών προϊόντων είναι η επιστήμη που μελετά τον βαθμό αξιοποίησης των περιορισμένων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ποσοτήτων των διαθέσιμων συντελεστών δια μέσω της παραγωγής φυτικών προϊόντων. Με την εφαρμογή των αρχών και νόμων της οικονομικής εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση του οικογενειακού και εθνικού γεωργικού εισοδήματος. Για την μεγιστοποίηση του εισοδήματος του παραγωγού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλα οι συντελεστές παραγωγής (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

10.2.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Με τον όρο συντελεστές παραγωγής εννοούμε οποιονδήποτε παράγοντα που χρησιμοποιείται στη διαδικασία της παραγωγής γεωργικών προϊόντων. Στους συντελεστές παραγωγής περιλαμβάνονται οι σπόροι, τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, τα λιπάσματα, τα καύσιμα, το έδαφος, η εργασία, οι κτηριακές εγκαταστάσεις, τα γεωργικά μηχανήματα κ.α. Οι συντελεστές παραγωγής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους σταθερούς και τους μεταβλητούς. Στους σταθερούς συντελεστές περιλαμβάνονται οι κτηριακές εγκαταστάσεις, τα γεωργικά μηχανήματα και το έδαφος ενώ στους μεταβλητούς περιλαμβάνονται οι σπόροι, οι φυτοπροστατευτηκές ουσίες, τα λιπάσματα, οι ζωοτροφές κ.α. (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

10.2.3. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ

Ακαθάριστη πρόσοδος είναι η συνολικά παραγόμενη ποσότητα προϊόντων εκφρασμένη σε χρήμα ως αποτέλεσμα της οικονομικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται μέσα σε μια οικονομική μονάδα σε ορισμένο χρονικό διάστημα. (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

Η ακαθάριστη πρόσοδος υπολογίζεται ως το γινόμενο της ποσότητας του παραγόμενου προϊόντος επί την τιμή ανά μονάδα προϊόντος (Κιτσοπανίδης κ.α., 2003, Lampkin, 1990, Μπάτζιος, 2001, Παπαναγιώτου, 2008).

10.2.4. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ

Με τον όρο άμεσες δαπάνες ή παραγωγικές δαπάνες μιας γεωργικής εκμετάλλευσης ή ενός κλάδου γεωργικής παραγωγής εννοούμαι τις κάθε φύσεως και μορφής πραγματοποιούμενες δαπάνες κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Οι δαπάνες αυτές αποτελούνται από την υπολογιζόμενη και καταβαλλόμενη αμοιβή, αξία ή κόστος χρησιμοποιήσεως των συντελεστών παραγωγής (έδαφος, εργασία, κεφάλαιο). Οι παραγωγικές δαπάνες αποτελούνται από το ενοίκιο του εδάφους, από την αμοιβή της καταβαλλόμενης οικογενειακής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

και ξένης εργασίας και από τη δαπάνη του χρησιμοποιούμενου σταθερού και μεταβλητού κεφαλαίου. Στις σταθερές δαπάνες κεφαλαίου περιλαμβάνονται διάφορες ετήσιες δαπάνες όπως έξοδα συντήρησης, ασφάλιστρα, τόκοι και αποσβέσεις ενώ στις μεταβλητές δαπάνες περιλαμβάνονται οι δαπάνες για την αγορά αγροεφοδίων, καυσίμων κ.α. (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

10.2.5. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ

Όταν αναφέρουμε το όρο ακαθάριστο κέρδος μιας εκμετάλλευσης εννοούμε το κομμάτι της ακαθάριστης προσόδου το οποίο καλείται να καλύψει το συνολικό κόστος αυτής ή το κόστος των προϋπαρχόντων συντελεστών παραγωγής. Το ακαθάριστο κέρδος υπολογίζεται από την αφαίρεση του μεταβλητού κόστους από την ακαθάριστη πρόσοδο (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

10.2.6. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΟΣΤΟΣ

Το σταθερό κόστος ενός φυτικού προϊόντος είναι το σύνολο της αμοιβής ή της δαπάνης των σταθερών συντελεστών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του. Το σταθερό κόστος περιλαμβάνει το ενοίκιο του εδάφους και τις ετήσιες δαπάνες (απόσβεση, συντήρηση, ασφάλιστρα και τόκος) των διαφόρων μορφών του σταθερού κεφαλαίου (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

Μεταβλητό κόστος παραγωγής ενός φυτικού προϊόντος είναι το σύνολο της αμοιβής ή της αξίας των μεταβλητών συντελεστών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του. Στο μεταβλητό κόστος περιλαμβάνεται η αμοιβή της χρησιμοποιούμενης οικογενειακής και ξένης εργασίας, η αμοιβή της χρήσης ξένων μηχανημάτων υπό μορφή εργασίας και δικαιωμάτων, η αξία του χρησιμοποιούμενου μεταβλητού κεφαλαίου (σπόροι, λιπάσματα, φυτοφάρμακα, καύσιμα, λιπαντικά και τόκοι όλων αυτών) (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 1992).

10.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

10.3.1. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ

Η ακαθάριστη πρόσοδος από την οικονομική δραστηριότητα του κάθε έτους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον θετικό ή αρνητικό απολογισμό του έτους (Μπάτζιος, 2001, Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 2003, Κιτσοπανίδης, 2006, Παπαναγιώτου, 2008).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στον παρακάτω Πίνακα 10.1 παρουσιάζεται η ακαθάριστη πρόσοδος για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η ακαθάριστη πρόσοδος όπως ήδη αναφέρθηκε αποτελεί το γινόμενο της ποσότητας ξηρής βιομάζας επί την τιμή της ανά κιλό. Η τιμή της ξηρής βιομάζας θεωρήθηκε ίση με 0,065 €/Kg και προέκυψε από την αντίστοιχη τιμή ανά κιλό χλωρής βιομάζας λαμβάνοντας υπόψη ότι η ξηρή βιομάζα αποτελεί περίπου το 25% της αντίστοιχης χλωρής (μέση τιμή της τριετίας 2007-2009).

Πίνακας 10.1: Ακαθάριστη πρόσοδος κάθε μεταχείρισης για κάθε μια καλλιεργητική περίοδο και η μέση τιμή της

	ΕΤΟΣ	A100	E50	E70	E100	M.O	Y50	Y70	Y100	M.O
Παραγωγή Ξηρής Βιομάζας (Kg/στρ.)	2007	3478	2718	3038	3553	3103	3259	3357	4287	3634
	2008	3937	2317	3218	4185	3240	3083	3960	4410	3818
	2009	4000	2375	3025	3975	3125	2925	3750	4200	3625
Τιμή Προϊόντος (€/Kg)	2007	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Επιδότηση Ενεργειακών Φυτών (€/στρ.)		4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Ακαθάριστη Πρόσοδος (€/στρ.)	2007	**226,1b**	176,8c	197,5bc	231,0b	**201,8**	211,8bc	218,2b	278,7a	**236,2**
	2008	**256,0a**	150,7c	209,2b	247,1a	**202,3**	200,4b	257,4a	286,6a	**248,1**
	2009	**245,4ab**	154,4c	196,6bc	258,4ab	**203,1**	190,1bc	243,8ab	273,0a	**235,6**

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ακαθάριστη πρόσοδος παρουσίασε διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια και των τριών καλλιεργητικών περιόδων. Στην υπόγεια στάγδην άρδευση η ακαθάριστη πρόσοδος ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη έρευνας. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές μεταξύ της υπόγειας και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης ήταν 17,0%, 22,6% και 16,0% αντίστοιχα. Μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές που οφείλονταν στην διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δόσεων άρδευσης που εφαρμόστηκαν. Η μικρότερη ακαθάριστη πρόσοδος παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (ET) ενώ η μεγαλύτερη σε εκείνες που δέχτηκαν πλήρη άρδευση. Ειδικότερα, μεταξύ των μεταχειρίσεων A100 και E100, στις οποίες η δόση άρδευσης καθορίζονταν από αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας και εξατμισίμετρο τύπου Α, αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ακαθάριστη πρόσοδο σε καμία από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

10.3.2. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε οικονομική μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών μεθόδων άρδευσης (επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση) και διαφορετικών δόσεων άρδευσης (50, 70 και 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής). Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι συνολικές καλλιεργητικές εργασίες, η συνολική έκταση της καλλιέργειας, η συνολική αξία αναλώσιμων, το συνολικό κόστος για την αγορά ενός πλήρους συστήματος στάγδην άρδευσης, και η συνολική αξία του πάγιου κεφαλαίου (Μυγδάκος κ.α., 2009). Οι συνολικές καλλιεργητικές εργασίες περιελάμβαναν την αμοιβή για την χρήση των μηχανημάτων, την αμοιβή για την εργασία των χειριστών, την αμοιβή για τα καύσιμα και τα λιπαντικά. Αποσβέσεις, ασφάλιστρα και έξοδα συντήρησης δεν συμπεριελήφθησαν στην ανάλυση διότι ο εξοπλισμός θεωρήθηκε ως ξένη μηχανική εργασία (Μυγδάκος κ.α., 2009). Λιπάσματα και φυτοπροστατευτηκές ουσίες δεν χρησιμοποιήθηκαν γιατί όπως αναφέρθηκε επιδιώχθηκε η εφαρμογή γεωργίας χαμηλών εισροών. Εξαίρεση αποτελεί η χρήση ζιζανιοκτόνου ουσίας τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 η οποία έγινε στο πλαίσιο της οικονομικής μελέτης. Αναλυτικότερα, την περίοδο 2007 εφαρμόστηκαν τρείς χειρονακτικές ζιζανιοκτονίες και μετρήθηκε η επίδρασή τους στο συνολικό κόστος της καλλιέργειας και στο ακαθάριστο κέρδος του παραγωγού. Τις περιόδους 2008 και 2009 εφαρμόστηκε μια χημική ζιζανιοκτονία αμέσως μετά τη σπορά και πριν το φύτρωμα της καλλιέργειας η οποία συνδυάστηκε με μια χειρονακτική ζιζανιοκτονία την περίοδο 2008 και δύο χειρονακτικές ζιζανιοκτονίες την περίοδο 2009 έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση κάθε συνδυασμού στο ακαθάριστο κέρδος του παραγωγού.

Στην παρούσα οικονομική μελέτη έγινε η παραδοχή ότι δεν υπήρχε σύστημα άρδευσης. Έτσι στο συνολικό κόστος παραγωγής συμπεριελήφθη και το κόστος για την αγορά ενός πλήρους συστήματος στάγδην άρδευσης. Ως χρόνος ωφέλιμης ζωής του συστήματος θεωρήθηκαν τα 15 χρόνια (Ayars et al., 1999). Ο υπολογισμός του κόστους χρήσης αρδευτικού νερού βασίστηκε στο αντίτιμο που καταβάλουν οι παραγωγοί της περιοχής Φαρσάλων στον Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων για την πλήρη ικανοποίηση των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας καλαμποκιού (€/στρ.). Στο Νομό Λάρισας οι ανάγκες της καλλιέργειας του καλαμποκιού σε νερό ανέρχονται σε 732mm για το σύνολο της αρδευτικής περιόδου (Sakellariou and

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Vagenas, 2005a). Έτσι, με βάση την ποσότητα αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε συνολικά στην κάθε μεταχείριση (στάγδην άρδευση και καταιονισμός) υπολογίστηκε το κόστος χρήσης νερού για κάθε μεταχείριση. Ειδικότερα, για τη μεταχείριση Α100 λαμβάνεται υπόψη το επιπλέον κόστος για την αγορά του απαιτούμενου εξοπλισμού για την πλήρη αυτοματοποίηση της άρδευσης.

Στον παρακάτω Πίνακα 10.2 φαίνονται αναλυτικά οι συνολικές δαπάνες που πραγματοποιήθηκαν για τις καλλιεργητικές εργασίες και την αγορά ενός πλήρους συστήματος στάγδην άρδευσης και ενός πλήρους συστήματος αυτοματοποιημένης στάγδην άρδευσης για τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του κόστους αγοράς ανά στρέμμα ενός πλήρους αυτοματοποιημένου συστήματος άρδευσης έγινε η παραδοχή ότι ένα τέτοιο σύστημα καλύπτει έκταση 25 στρεμμάτων περίπου και ότι ο χρόνος ωφέλιμης ζωής του είναι τα 10 χρόνια.

Πίνακας 10.2: Άμεσες δαπάνες για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

Παραγωγικοί Συντελεστές	A100	E50	E70	E100	Y50	Y70	Y100
Πλήρης Εξοπλισμός Αυτοματοποίησης της Άρδευσης (€/στρ.)	15	0	0	0	0	0	0
Ζιζανιοκτόνος Ουσία (€/στρ.)	3	3	3	3	3	3	3
Αξία Σπόρου (€/kg)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Καλλιεργητικές Εργασίες (€/στρ.)	39	39	39	39	39	39	39
Εγκ/αση-Απεγκ/αση στάγδην άρδευσης.(€/στρ.)	6	6	6	6	6	6	6
Συγκομιδή-Δεματοποίηση-Μεταφορά (€/στρ.)	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Κόστος Υπεδαφοθέτη (€/στρ.)	0	0	0	0	22	22	22
Υπόγεια Ζιζανιοκτονία (€/στρ.) / 2 Χρόνια	0	0	0	0	9	9	9
Αναλώσιμα Στάγδην Άρδευσης (€/στρ.) / 15 Χρόνια	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Πλήρες Σύστημα Υδρολιπαντήρα & Φίλτρων Κεφαλής (€/στρ.) / 15 Χρόνια	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Σταλακτηφόρος Σωλήνας Φ20 (0,8m) (€/στρ.) / 15 Χρόνια	10	10	10	10	10	10	10
Βαλβίδα Αντεπιστροφής (€) / 15 Χρόνια	0	0	0	0	1	1	1
Ενοίκιο Γής (€/στρ.)	50	50	50	50	50	50	50
Σύνολο (€/στρ.)	148,1	133,1	133,1	133,1	165,1	165,1	165,1

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Στον Πίνακα 10.3 φαίνεται το κόστος χρήσης νερού, το κόστος εργατικών χεριών και το κόστος του μόνιμου και κυκλοφορούντος κεφαλαίου για κάθε μια από τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009.

Πίνακας 10.3: Κόστος χρήσης νερού, εργατικών χεριών, κεφαλαίου για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

	ΕΤΟΣ	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Μ.Ο	Υ50	Υ70	Υ100	Μ.Ο
Σύνολο από Πίνακα 9.1 (€/στρ.)		148,1	133,1	133,1	133,1	133,1	165,1	165,1	165,1	148,1
Κόστος Χρήσης Αρδευτικού Νερού (Κάλυψη 100% των Αναγκών του Καλαμποκιού) (€/στρ.)	2007	41,1	24,2	31,1	41,1	32,1	24,7	31,3	41,5	32,5
	2008	35,0	24,5	31,7	42,0	32,7	24,7	31,8	41,7	32,7
	2009	30,4	20,8	25,5	32,6	26,3	21,0	25,1	32,2	26,1
Σκαλίσματα Χειρονακτικά	2007	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	2008	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	2009	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Τόκοι Μόνιμου Κεφαλαίου	2007	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45
	2008	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45
	2009	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45
Τόκοι Κυκλοφ/ντος Κεφαλαίου	2007	3,21	2,74	2,84	2,99	2,86	2,78	2,88	3,04	2,90
	2008	2,22	1,84	1,95	2,10	1,96	1,88	1,99	2,14	2,00
	2009	2,60	2,23	2,30	2,41	2,31	2,28	2,34	2,45	2,35
Σύνολο Παραγωγικών Δαπανών (€/στρ.)	2007	**282,3**	250,0	257,0	267,1	**258,0**	253,9	260,6	270,9	**261,7**
	2008	**215,2**	189,3	196,7	207,1	**197,7**	193,0	200,2	210,3	**201,2**
	2009	**241,0**	216,0	220,8	228,0	**221,6**	219,7	223,8	231,1	**224,9**

Στον παραπάνω Πίνακα 10.3 παρουσιάζονται οι άμεσες δαπάνες για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέση τιμή του συνόλου των άμεσων δαπανών για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές μεταξύ των υπόγειας και επιφανειακής, στάγδην άρδευσης ήταν 1,4%, 1,7% και 1,5% αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των δυο μεθόδων άρδευσης οφείλονταν:

- στις διαφορετικότητες του εξοπλισμού και των καλλιεργητικών εργασιών που εφαρμόστηκαν (χρήση υπεδαφοθέτη στην υπόγεια, ετήσια εγκατάσταση-απεγκατάσταση σταλακτηφόρων στην επιφανειακή στάγδην άρδευση),
- στις διαφορετικές αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- στις διαφορετικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν την κάθε καλλιεργητική περίοδο, ως αποτέλεσμα των κλιματικών συνθηκών, και άρα του διαφορετικού κόστους χρήσης νερού άρδευσης.

Διαφορές ως προς τις άμεσες δαπάνες παρατηρούνται και μεταξύ των μεταχειρίσεων A100 και E100 της ET. Ειδικότερα, τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών ήταν 5,4%, 3,8% και 5,4% αντίστοιχα. Οι διαφορές εντός του κάθε έτους οφείλονταν κυρίως στο διαφορετικό κόστος του εξοπλισμού και των εργασιών για την εγκατάσταση και απεγκατάσταση του κάθε συστήματος άρδευσης. Οι διαφορές μεταξύ των ετών οφείλονταν στην διαφορετική παραγωγικότητά τους.

10.3.3. ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΝΕΡΟΥ

Από τις τιμές των άμεσων δαπανών υπολογίστηκε το άμεσο κόστος ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος (ξηρής βιομάζας). Το άμεσο κόστος ανά μονάδα προϊόντος είναι το πηλίκο της διαίρεσης των άμεσων δαπανών δια την συνολική παραγωγή ξηρής βιομάζας (Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 2003, Κιτσοπανίδης, 2006).

Πίνακας 10.4: Άμεσο κόστος παραγωγής για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

	ΕΤΟΣ	A100	E50	E70	E100	M.O	Y50	Y70	Y100	M.O
Παραγωγή Ξηρής Βιομάζας (Kg/στρ.)	2007	3478	2718	3038	3553	3103	3259	3357	4287	3634
	2008	3937	2317	3218	4185	3240	3083	3960	4410	3818
	2009	4000	2375	3025	3975	3125	2925	3750	4200	3625
Σύνολο Παραγωγικών Δαπανών (€/στρ.)	2007	282,3	250,0	257,0	267,1	258,0	253,9	260,6	270,9	261,7
	2008	215,2	189,3	196,7	207,1	197,7	193,0	200,2	210,3	201,2
	2009	241,0	216,0	220,8	228,0	221,6	219,7	223,8	231,1	224,9
Άμεσο Κόστος Παραγωγής (€/στρ.)	2007	**0,082bc**	0,093c	0,086bc	0,076ab	**0,086**	0,079b	0,078b	0,064a	**0,074**
	2008	**0,055ab**	0,084d	0,062bc	0,050ab	**0,065**	0,064c	0,051ab	0,048a	**0,054**
	2009	**0,061ab**	0,093c	0,074ab	0,059ab	**0,076**	0,077bc	0,062ab	0,057a	**0,065**

Στον παραπάνω Πίνακα 10.4 παρουσιάζεται το άμεσο κόστος παραγωγής για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέση τιμή του άμεσου κόστους παραγωγής για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με την επιφανειακή για κάθε μια από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Τις καλλιεργητικές περιόδους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2007, 2008 και 2009 οι διαφορές μεταξύ των υπόγειας και επιφανειακής, στάγδην άρδευσης ήταν 16,2%, 20,4% και 16,9% αντίστοιχα. Οι διαφορές οφείλονταν:

- στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δόσεων άρδευσης εντός του ίδιου έτους,
- στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων ως αποτέλεσμα της παραλλακτικότητας μεταξύ των τριών ετών της έρευνας,
- στο διαφορετικό κόστος χρήσης αρδευτικού νερού ως αποτέλεσμα των διαφορετικών ποσοτήτων νερού άρδευσης λόγω της παραλλακτικότητας μεταξύ των τριών ετών της έρευνας και
- στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας.

Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής δεν παρατηρούνται μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Ειδικότερα, μεταξύ των καλλιεργητικών περιόδων 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών ήταν 4,7%, 8,3% και 3,4% αντίστοιχα. Μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές, κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας, που οφείλονταν στην διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δόσεων άρδευσης που δέχτηκαν. Το μεγαλύτερο άμεσο κόστος παραγωγής παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (ΕΤ) ενώ το μικρότερο σε εκείνες που δέχτηκαν πλήρη άρδευση κυρίως λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ξηρής βιομάζας. Η στατιστική επεξεργασία έδειξε ότι μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές, ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής, διαχρονικά, εκτός από τη μεταχείριση Ε50 που ήταν η λιγότερο παραγωγική.

Στη σύγχρονη γεωργική πρακτική η μεγιστοποίηση της παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας τείνει να εγκαταλειφτεί. Τη θέση της καταλαμβάνει η τάση μεγιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα νερού (Βύρλας, 2007). Λαμβάνοντας υπόψη την τάση αυτή έγινε προσπάθεια υπολογισμού του άμεσου κόστους ανά μονάδα καταναλισκόμενου νερού άρδευσης.

Στον παρακάτω Πίνακα 10.5 παρουσιάζεται το άμεσο κόστος νερού για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη , επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Το άμεσο κόστος νερού άρδευσης υπολογίστηκε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ως το πηλίκο των συνολικών άμεσων δαπανών δια την συνολική ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια (στάγδην άρδευση και καταιονισμός).

Πίνακας 10.5: Άμεσο κόστος νερού για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

	ΕΤΟΣ	A100	E50	E70	E100	M.O	Y50	Y70	Y100	M.O
Συνολικό Νερό Άρδευσης (m^3/στρ.)	2007	494,5	337,5	415,0	530,5	427,7	341,0	408,0	524,5	424,5
	2008	569,5	398,0	516,0	683,0	532,3	402,5	517,0	679,0	532,8
	2009	669,0	395,0	506,5	668,5	523,3	401,5	509,5	675,0	528,7
Σύνολο Παραγωγικών Δαπανών (€/στρ.)	2007	282,3	250,0	257,0	267,1	258,0	253,9	260,6	270,9	261,7
	2008	215,2	189,3	196,7	207,1	197,7	193,0	200,2	210,3	201,2
	2009	241,0	216,0	220,8	228,0	221,6	219,7	223,8	231,1	224,9
Άμεσο Κόστος Νερού (€/m^3)	2007	**0,422a**	0,634c	0,508b	0,400a	**0,514**	0,633c	0,512b	0,402a	**0,516**
	2008	**0,378b**	0,476c	0,381b	0,303a	**0,387**	0,480c	0,388b	0,310a	**0,393**
	2009	**0,488b**	0,641d	0,532c	0,430a	**0,534**	0,645d	0,549c	0,441a	**0,545**

Από τον παραπάνω Πίνακα 10.5 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέση τιμή του άμεσου κόστους νερού για την αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους (επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση) και για τα τρία έτη της έρευνας. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009, οι διαφορές μεταξύ υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης ήταν 0,4%, 1,5% και 2,0% αντίστοιχα. Οι διαφορές οφείλονταν:

- στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων ως αποτέλεσμα των διαφορετικών μεθόδων άρδευσης εντός του ίδιου έτους,
- στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων ως αποτέλεσμα της παραλλακτικότητας μεταξύ των τριών ετών της έρευνας,
- στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας.

Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος νερού παρατηρούνται και μεταξύ των μεταχειρίσεων A100 και E100 της ΕΤ. Ειδικότερα, τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών ήταν 5,2%, 19,8% και 11,9% αντίστοιχα. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 οφείλεται στο γεγονός ότι στη μεταχείριση A100 το 2008 εξοικονομήθηκε περίπου διπλάσια ποσότητα νερού το 2008 σε σύγκριση με αυτή που εξοικονομήθηκε την περίοδο 2009. Μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές που οφείλονταν στην διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δόσεων άρδευσης που δέχτηκαν. Το μικρότερο άμεσο κόστος νερού

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (ΕΤ) ενώ το μεγαλύτερο σε εκείνες που δέχτηκαν πλήρη άρδευση κυρίως λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ξηρής βιομάζας. Ειδικότερα, μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το άμεσο κόστος νερού στις καλλιεργητικές περιόδους 2007 και 2009 ενώ την καλλιεργητική 2008 η διαφορά ήταν σημαντική.

10.3.4. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ

Το ακαθάριστο κέρδος αποτελεί τον κυριότερο οικονομικό παράγοντα (Lampkin, 1990, Κιτσοπανίδης και Καμενίδης, 2003, Κιτσοπανίδης, 2006). Το ακαθάριστο κέρδος υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ των άμεσων δαπανών και της ακαθάριστης προσόδου.

Στον παρακάτω Πίνακα 10.6 παρουσιάζεται το ακαθάριστο κέρδος για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη , επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέση τιμή του ακαθάριστου κέρδους για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009, οι διαφορές μεταξύ υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης ήταν 145,4%, 72,5% και 158,2% αντίστοιχα. Οι διαφορές οφείλονταν κυρίως στην μεγαλύτερη παραγωγή ξηρής βιομάζας που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις οι οποίες αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την αντίστοιχη παραγωγή ξηρής βιομάζας από τις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με επιφανειακή στάγδην άρδευση.

Πίνακας 10.6: Ακαθάριστο κέρδος για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

	ΕΤΟΣ	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Μ.Ο	Υ50	Υ70	Υ100	Μ.Ο
Ακαθάριστη Πρόσοδος (€/στρ.)	2007	226,1	176,8	197,5	231,0	201,8	211,8	218,2	278,7	236,2
	2008	256,0	150,7	209,2	247,1	202,3	200,4	257,4	286,6	248,1
	2009	245,4	154,4	196,6	258,4	203,1	190,1	243,8	273,0	235,6
Σύνολο Παραγωγικών Δαπανών (€/στρ.)	2007	282,3	250,0	257,0	267,1	258,0	253,9	260,6	270,9	261,7
	2008	215,2	189,3	196,7	207,1	197,7	193,0	200,2	210,3	201,2
	2009	241,0	216,0	220,8	228,0	221,6	219,7	223,8	231,1	224,9
Ακαθάριστο Κέρδος (€/στρ.)	2007	**-56,3b**	-73,3b	-59,5b	-36,2b	**-56,3**	-42,1b	-42,5b	7,7a	**25,6**
	2008	**40,7ab**	-38,7c	12,5b	64,9a	**12,9**	7,3b	57,2a	76,4a	**47,0**
	2009	**19,0ab**	-61,6c	-24,2bc	30,4ab	**-18,5**	-29,5bc	19,9ab	41,9a	**10,8**

Από τον παραπάνω Πίνακα 10.6 φαίνεται ότι το ακαθάριστο κέρδος εξαρτάται από την απόδοση σε ξηρή βιομάζα της κάθε μεταχείρισης. Έτσι, οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ απέδωσαν μικρότερη ποσότητα ξηρής βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους ανεξάρτητα από τη μέθοδο άρδευσης που εφαρμόστηκε. Αντίθετα, οι μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 100% της ΕΤ με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης απέδωσαν τη μέγιστη ποσότητα ξηρή βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους. Στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό ή θετικό ανάλογα με την παραγωγικότητά τους σε κάθε καλλιεργητική περίοδο.

Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το ακαθάριστο κέρδος μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Ειδικότερα, τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών ήταν 35,7%, 37,3% και 37,4% αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι στη μεταχείριση Α100 το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και τις δύο καλλιεργητικές περιόδους που εφαρμόστηκε πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση (2008-2009) ενώ την καλλιεργητική περίοδο 2007 κατά την οποία δεν είχε εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και μικρότερο από το αντίστοιχο της μεταχείρισης Ε100 (επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση 100 της ΕΤ). Οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών ως προς το ακαθάριστο κέρδος ήταν αποτέλεσμα δύο παραγόντων:

- της διαφορετικής απόδοσης σε ξηρή βιομάζα και
- του αυξημένου κόστους πρώτης εγκατάστασης του εξοπλισμού πλήρους αυτοματοποίησης της άρδευσης.

Οι διαφορές εντός του κάθε έτους οφείλονταν κυρίως στην διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας και το διαφορετικό κόστος εξοπλισμού.

10.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο πλαίσιο της οδηγίας 2000/60/ΕΕ απαιτείται οικονομική αποτίμηση του κόστους ή της οικονομικής ωφέλειας από την εξοικονόμηση νερού άρδευσης τόσο σε επίπεδο διαχείρισης του νερού ως φυσικού πόρου αλλά και σε επίπεδο διαχείρισης του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η συγκεκριμένη οδηγία αναφέρεται σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης και για το λόγο αυτό στην παρακάτω μελέτη δεν

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

γίνεται αναφορά στο περιβαλλοντικό κόστος καθώς και στο κόστος φυσικών πόρων.

10.4.1. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΗ ΠΡΟΣΟΔΟΣ

Η μελέτη των αποτελεσμάτων ως προς την ακαθάριστη πρόσοδο έδειξε ότι παρουσιάστηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια και των τριών καλλιεργητικών περιόδων. Στην υπόγεια στάγδην άρδευση η ακαθάριστη πρόσοδος ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη έρευνας. Η διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών δόσεων άρδευσης που δέχτηκαν επηρέασε την ακαθάριστη πρόσοδο. Σημαντικά μικρότερη τιμή ακαθάριστης προσόδου παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (ΕΤ) ενώ σημαντικά μεγαλύτερη ήταν στην μεταχείριση Υ100 (υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση ίση με το 100% της ΕΤ). Ειδικότερα, μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100, στις οποίες η δόση άρδευσης καθορίζονταν από αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας και εξατμισίμετρο τύπου Α, αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ακαθάριστη πρόσοδο σε καμία από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.

10.4.2. ΑΜΕΣΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ

Διαφορές παρατηρήθηκαν και ως προς τις άμεσες δαπάνες για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η μέση τιμή του συνόλου των άμεσων δαπανών για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Εντός της κάθε καλλιεργητικής περιόδου, οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων άρδευσης οφείλονταν στο διαφορετικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, στις διαφορετικές καλλιεργητικές εργασίες που εφαρμόστηκαν, στις διαφορετικές αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα και στις διαφορετικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν την κάθε καλλιεργητική περίοδο, ως αποτέλεσμα των κλιματικών συνθηκών, και άρα του διαφορετικού κόστους χρήσης νερού άρδευσης. Διαφορές ως προς τις άμεσες δαπάνες παρατηρήθηκαν και μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Οι αντίστοιχες διαφορές μεταξύ των ετών οφείλονταν στο διαφορετικό κόστος εργατικών χεριών (χειρονακτική ζιζανιοκτονία) και στο διαφορετικό κόστος χρήσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

νερού ως αποτέλεσμα των διαφορετικών απαιτήσεων της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονταν από τους κλιματικούς παράγοντες.

10.4.3. ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΝΕΡΟΥ

Το άμεσο κόστος παραγωγής για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) διαφοροποιούνταν και αυτό για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η τιμή του για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με την επιφανειακή για κάθε μια από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων οφείλονταν στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας, στο διαφορετικό κόστος χρήσης αρδευτικού νερού ως αποτέλεσμα των διαφορετικών ποσοτήτων νερού, στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας. Σημαντικά μεγαλύτερο άμεσο κόστος παραγωγής παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ ενώ σημαντικά μικρότερο στη μεταχείριση Υ100 κυρίως λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ξηρής βιομάζας. Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής δεν παρατηρούνται μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ.

Η μέση τιμή του άμεσου κόστους νερού για την αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους (επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση) και για τα τρία έτη της έρευνας. Σημαντικά μεγαλύτερο άμεσο κόστος νερού παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ ενώ σημαντικά μικρότερο στη μεταχείριση Υ100. Οι διαφορές οφείλονταν στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο εντός του ίδιου έτους όσο και μεταξύ των τριών ετών της έρευνας και στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού επεμβάσεων χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας. Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος νερού παρατηρούνται και μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 οφείλεται στο γεγονός ότι στη μεταχείριση Α100 το 2008 εξοικονομήθηκε περίπου διπλάσια ποσότητα νερού το 2008 σε σύγκριση με αυτή που εξοικονομήθηκε την περίοδο 2009.

Η προσπάθεια υπολογισμού του άμεσου κόστους νερού έγινε για να διαπιστωθεί κατά πόσο καθίσταται συμφέρουσα μια σημαντική επένδυση σε αγορά

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εξοπλισμού σε συνάρτηση με την διαθεσιμότητα νερού άρδευσης. Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι στην περίπτωση που υπάρχει επάρκεια νερού άρδευσης για πλήρη κάλυψη των αναγκών μιας καλλιέργειας τότε το κόστος είναι χαμηλό και επομένως η επένδυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρότερο κίνδυνο αποτυχίας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει επάρκεια νερού άρδευσης τότε αυξάνεται ο κίνδυνος η επένδυση να αποτύχει. Επομένως, ο επενδυτής θα πρέπει να στραφεί σε διαφορετική επένδυση ή να οργανώσει κατά τέτοιο τρόπο τις καλλιεργητικές πρακτικές που θα εφαρμόσει έτσι ώστε ο όποιος κίνδυνος αποτυχίας της επένδυσης να ελαχιστοποιηθεί.

10.4.4. ΑΚΑΘΑΡΙΣΤΟ ΚΕΡΔΟΣ

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, το ακαθάριστο κέρδος για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο διαφοροποιούνταν, επίσης. Η τιμή του για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Οι διαφορές οφείλονταν κυρίως στην μεγαλύτερη παραγωγή ξηρής βιομάζας που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις οι οποίες αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την αντίστοιχη παραγωγή ξηρής βιομάζας από τις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με επιφανειακή στάγδην άρδευση. Οι μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ απέδωσαν μικρότερη ποσότητα ξηρής βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους ανεξάρτητα από τη μέθοδο άρδευσης που εφαρμόστηκε. Αντίθετα, οι μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 100% της ΕΤ με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης απέδωσαν τη μέγιστη ποσότητα ξηρής βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους.

Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το ακαθάριστο κέρδος μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι στη μεταχείριση Α100 το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και τις δύο καλλιεργητικές περιόδους που εφαρμόστηκε πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση (2008-2009) ενώ την καλλιεργητική περίοδο 2007 κατά την οποία δεν είχε εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και μικρότερο από το αντίστοιχο της μεταχείρισης Ε100 (επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση 100 της ΕΤ).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

10.4.5. ΣΗΜΕΙΟ ΙΣΟΣΚΕΛΙΣΜΟΥ ΕΣΟΔΩΝ-ΕΞΟΔΩΝ

Σε μια προσπάθεια περαιτέρω επέκτασης της έρευνας υπολογίστηκε το σημείο οικονομικού ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων. Με τον όρο αυτό περιγράφεται η κατάσταση κατά την οποία η ακαθάριστη πρόσοδος και οι άμεσες δαπάνες παραγωγής έχουν την ίδια τιμή (Μπάτζιος, 2001, Κιτσοπανίδης, 2006, Παπαναγιώτου, 2008).

Για τον υπολογισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων έγινε παραδοχή ότι η τιμή των άμεσων δαπανών παραγωγής ισούται με την μέση τιμή των μέγιστων δαπανών παραγωγής κατά την τριετία της έρευνας (237,4€/στρ.) όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.7. Όπως προκύπτει από τον ορισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων, η παραγωγή ξηρής βιομάζας που πρέπει να επιτευχθεί είναι 3652,3kg/στρ. όταν η τιμή προϊόντος είναι 0,065€/Kg. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ποσότητα ξηρής βιομάζας που παράχθηκε την τριετία 2007-2009 (3424,2Kg) πρέπει να αυξηθεί περισσότερο από 6% ή κατά 228,1Kg/στρ. Επίτευξη μέσης παραγωγής μεγαλύτερης από 3652,3Kg/στρ. καθιστά την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου επικερδή για τις συνθήκες της Θεσσαλίας.

Πίνακας 10.7: Άμεσες δαπάνες παραγωγής για τις περιόδους 2007, 2008 και 2009.

	ΕΤΟΣ	Α100	Ε50	Ε70	Ε100	Μ.Ο	Υ50	Υ70	Υ100	Μ.Ο
Παραγωγή Ξηρής Βιομάζας (Kg/στρ.)	2007	**3478**	2718	3038	3553	**3103**	3259	3357	4287	**3634**
	2008	**3937**	2317	3218	4185	**3240**	3083	3960	4410	**3818**
	2009	**4000**	2375	3025	3975	**3125**	2925	3750	4200	**3625**
Σύνολο Παραγωγικών Δαπανών (€/στρ.)	2007	**282,3**	250,0	257,0	267,1	**258,0**	253,9	260,6	270,9	**261,7**
	2008	**215,2**	189,3	196,7	207,1	**197,7**	193,0	200,2	210,3	**201,2**
	2009	**241,0**	216,0	220,8	228,0	**221,6**	219,7	223,8	231,1	**224,9**

Ειδικά για την πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση, το σημείο ισοσκελισμού διαφοροποιείται ελαφρώς λόγω του κόστους του επιπλέον εξοπλισμού. Για τον υπολογισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων στην περίπτωση της μεταχείρισης Α100 έγινε παραδοχή ότι η τιμή των άμεσων δαπανών παραγωγής ισούται με την μέση τιμή των μέγιστων δαπανών παραγωγής κατά την τριετία της έρευνας (246,2€/στρ.) όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.7. Όπως προκύπτει από τον ορισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων, η παραγωγή ξηρής βιομάζας που πρέπει να επιτευχθεί είναι 3787,7kg/στρ. όταν η τιμή προϊόντος είναι 0,065€/Kg. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ποσότητα ξηρής βιομάζας που παράχθηκε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

την τριετία 2007-2009 (3805,0Kg) είναι μεγαλύτερη από 3787,7kg/στρ. και επομένως η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου είναι επικερδής για τις συνθήκες της Θεσσαλίας όταν εφαρμόζεται πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης.

Η καλλιέργεια του σόργου στην Ελλάδα μπορεί να αποφέρει ακόμη σημαντικότερα κέρδη στον παραγωγό όταν με την εφαρμογή κατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών μειωθούν οι δαπάνες παραγωγής. Μια τέτοια καλλιεργητική πρακτική είναι να εφαρμοστεί συνδυασμός μιας χημικής ζιζανιοκτονίας αμέσως μετά τη σπορά και πριν το φύτρωμα της καλλιέργειας και μιας μηχανικής ή χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας όταν τα φυτά βρίσκονται στο στάδιο των τριών φύλλων (ύψος περίπου 20-30cm). Από το στάδιο αυτό και έπειτα το φυτό αναπτύσσεται ραγδαία ανταγωνιζόμενο έντονα τα τυχόν ζιζάνια που εμφανίζονται. Από την μελέτη που προηγήθηκε προκύπτει ότι εάν εφαρμοστεί η τεχνική αυτή τότε το όφελος του παραγωγού ανέρχεται στα 55€/στρ.

Μια δεύτερη καλλιεργητική πρακτική που θα μπορούσε να εφαρμοστεί είναι η μείωση της δόσης άρδευσης. Εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης και ταυτόχρονη μείωση της δόσης κατά 30% της ET (μεταχείριση Y70) εξασφαλίζει μέση παραγωγή ξηρής βιομάζας μεγαλύτερη από 3652,3Kg/στρ. Η μείωση της δόσης άρδευσης συνεπάγεται μείωση του κόστους χρήσης νερού. Από τη μελέτη που προηγήθηκε προκύπτει ότι αν εφαρμοστεί η τεχνική αυτή τότε το όφελος για τον παραγωγό ανέρχεται στα 8€/στρ. Εάν η τεχνική αυτή συνδυαστεί και με κατάλληλο εξοπλισμό πλήρους αυτοματοποίησης τότε το κέρδος για τον παραγωγό αυξάνεται.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με κατάλληλες καλλιεργητικές πρακτικές είναι δυνατό να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου. Το συνολικό όφελος για τον παραγωγό μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει τα 60€/στρ. χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το όποιο κέρδος από την πώληση του προϊόντος. Εάν σε όλα τα παραπάνω συνυπολογιστεί το τεράστιο περιβαλλοντικό όφελος από την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και την διατήρηση του ισοζυγίου διοξειδίου του άνθρακα τότε γίνεται άμεσα αντιληπτό γιατί η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη καλλιέργεια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^{ο}

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

11.1. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν έναν κρίσιμο φυσικό πόρο απαραίτητο για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει στην μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω των αυξημένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και αρωματικών υδρογονανθράκων αλλά και στην επιβάρυνση των οικονομιών των εξαρτημένων χωρών με τις συνεχείς αυξομειώσεις στην τιμή τους. Επομένως, η ανταγωνιστική, αξιόπιστη και αειφόρος παραγωγή ενέργειας αποτελεί βασικό παράγοντα για την οικονομία. Επιπλέον, η απόκτηση τεχνογνωσίας στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλει στην μείωση προβλημάτων όπως είναι οι διακοπές ρεύματος λόγω κακοτεχνιών στα διεθνή δίκτυα μεταφοράς ενέργειας ή πρώτων υλών για την παραγωγή ενέργειας (πετρελαίου, φυσικού αερίου, λιθάνθρακα) αλλά και την αθέτηση διακρατικών συμφωνιών.

Το νερό αποτελεί έναν άλλο κρίσιμο φυσικό πόρο που είναι απαραίτητος για την αγροτική, βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, σήμερα οι υδατικοί πόροι καθίστανται ανεπαρκείς λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της επέκτασης των αρδευόμενων εκτάσεων, και της βιομηχανικής ανάπτυξης. Η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού (70% σε παγκόσμιο επίπεδο και πάνω από 80% στις περισσότερες Μεσογειακές χώρες). Οι αρδευόμενες εκτάσεις έχουν 6πλασιασθεί από το 1900 ενώ σήμερα το 40% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων προέρχεται από το 18% της αρδευόμενης γεωργίας. Η μείωση των βροχοπτώσεων, ως αποτέλεσμα των κλιματικών αλλαγών που υφίσταται ο πλανήτης μας, επηρεάζει τόσο τις περιοχές που εφαρμόζουν άρδευση για την

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

παραγωγή αγροτικών προϊόντων όσο και τις περιοχές που παράγουν προϊόντα χωρίς την εφαρμογή αρδεύσεων. Άμεσο αποτέλεσμα των συνθηκών αυτών είναι να απειλείται η διαβίωση δισεκατομμυρίων ανθρώπων, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η ζήτηση νερού για άρδευση εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 14% μέχρι το 2025 και την ίδια περίοδο 8-15% του νερού θα περικοπεί από τη γεωργία για να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης και βιομηχανίας. Επομένως, καλλιέργειες που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ικανοποιητικά σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας πλεονεκτούν έναντι άλλων ευαίσθητων στην έλλειψη νερού καλλιεργειών ενώ η εφαρμογή μεθόδων που εφαρμόζουν αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης τείνουν να αντικαταστήσουν εκείνες που παρουσιάζουν απώλειες νερού.

Μια από τις μεθόδους αποδοτικής εφαρμογής του αρδευτικού νερού είναι και η στάγδην άρδευση, επιφανειακή και υπόγεια. Το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης αποτελεί παραλλαγή της αντίστοιχης επιφανειακής εφαρμόζοντας το αρδευτικό νερό δια μέσω σταλακτηφόρων αγωγών που τοποθετούνται σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών συνεπάγεται εξοικονόμηση νερού άρδευσης, βελτίωση της ποιότητας και αύξηση της παραγωγής στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων που εφαρμόστηκαν. Ο συνδυασμός των μεθόδων αυτών με τεχνολογικά επιτεύγματα συνεπάγεται την μείωση του κόστους παραγωγής υπό την προϋπόθεση ότι τα συστήματα οργανώνονται, λειτουργούν και συντηρούνται κανονικά.

Η εκπόνηση της παρούσας έρευνας έγινε για να αξιολογηθεί:

- η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου υπό συνθήκες γεωργίας χαμηλών εισροών,
- η επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης με τις μεθόδους της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του φυτού σόργου,
- η μέθοδος επιφανειακής στάγδην άρδευσης με την χρήση αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους.

Ειδικότεροι στόχοι της εργασίας είναι:

- η επίδραση διαφορετικών δόσεων άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του ενεργειακού φυτού σόργου,
- η σύγκριση της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού στο σόργο,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- η σύγκριση της εφαρμογής τριών δόσεων άρδευσης με τη μέθοδο της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης με όρους οικονομικούς,
- η αξιολόγηση της μεθόδου υπολογισμού του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και την επεξεργασία με το πρόγραμμα AutoCAD,
- η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής της καλλιέργειας με την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου με ευφυή ρύθμιση άρδευσης.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευναw μελετήθηκαν δημοσιευμένες εργασίες για την επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιελάμβανε μελέτη πληροφοριών σχετικά με την επίδραση των μεθόδων αυτών στην ανάπτυξη και απόδοση διαφόρων καλλιεργειών, το βάθος τοποθέτησης των αγωγών εφαρμογής, το εύρος άρδευσης και την αποδοτικότητα χρήσης νερού. Τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών έδειξαν ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση επηρεάζει θετικά την απόδοση των καλλιεργειών στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου, του νομού Μαγνησίας. Στον συγκεκριμένο πειραματικό αγρό πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος στάγδην άρδευσης καθώς και η τοποθέτηση των αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας αλλά και του συστήματος πλήρους αυτοματοποίησης της επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Η έρευνα είχε τριετή διάρκεια και εφαρμόστηκε τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Το έδαφος, σε όλο το βάθος της τομής του, υπερίσχυαν τα κλάσματα της άμμου και η κοκκομετρική σύσταση βρίσκεται μεταξύ μέσης έως μετρίως χονδρόκοκκης ή μετρίως λεπτόκοκκής με υφή πηλώδη έως αμμοπηλώδη ή αργιλοπηλώδη.

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν πλήρως τυχαιοποιημένες ομάδες με επτά μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

I. **Υ100** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονται από την

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ημερήσια εξατμισοδιαπνοή (ET), η οποία υπολογίζεται με τη χρήση εξατμισίμετρου τύπου Α. Εύρος άρδευσης 2 ημέρες.

II. **Υ70** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 70% της ET. Εύρος άρδευσης ίδιο με την Υ100ET.

III. **Υ50** : Υπόγεια στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 50% της ET. Εύρος άρδευσης ίδιο με την Υ100ET.

IV. **Ε100** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% της ET (μάρτυρας). Εύρος άρδευσης ίδιο με την Υ100ET.

V. **Ε70** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 70% της ET. Εύρος άρδευσης ίδιο με την Υ100ET.

VI. **Ε50** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 50% της ET. Εύρος άρδευσης ίδιο με την Υ100ET.

VII. **Α100** : Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονται από την διακύμανση της υγρασίας εδάφους.

Οι αγωγοί εφαρμογής για το υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης τοποθετήθηκαν με ειδικό υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45m. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους ήταν πολυαιθυλένιο, η διάμετρός τους ήταν 20mm και ισαπήχαν 1,6m μεταξύ τους. Τοποθετήθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάθε επιφανειακός ή υπόγειος αγωγός εφαρμογής να βρίσκεται στο μέσον κάθε δεύτερου ζεύγους γραμμών σποράς. Οι αγωγοί εφαρμογής είχαν ενσωματωμένους αυτοκαθαριζόμενους και αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες με παροχή 2,3L/h σε ένα εύρος πίεσης μεταξύ 0,5 έως 1,0Atm.

Ειδικός εξοπλισμός χρησιμοποιήθηκε στη μεταχείριση Α100. Στη συγκεκριμένη μεταχείριση η δόση άρδευσης καθορίζονταν από την περιεχόμενη υγρασία εδάφους, όπως αυτή καταγράφονταν από αισθητήρα μέτρησης υγρασίας. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε επί της γραμμής σποράς έτσι ώστε να βρίσκεται στο μέσον μεταξύ δύο διαδοχικών σταλακτήρων. Με τον αισθητήρα ήταν συνδεδεμένος ειδικός καταγραφέας δεδομένων (data logger), ο οποίος ήταν εφοδιασμένος με κατάλληλο λογισμικό ικανό να ελέγχει την έναρξη, τη διάρκεια και τη λήξη της άρδευσης. Ο καταγραφέας ήταν συνδεδεμένος με ειδική ηλεκτροβάνα διαμέτρου 25mm. Το σύστημα αισθητήρας-καταγραφέας-ηλεκτροβάνα ήταν συνδεδεμένα με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

το δημόσιο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και επικουρούνταν από μπαταρία 9V.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υγρασίας εδάφους. Οι μετρήσεις υγρασίας πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρες T.D.R. και F.D.R. ως ποσοστό % κατά όγκο εδάφους. Προσδιορίστηκαν οι υδροδυναμικές παράμετροι του εδάφους (υδατοικανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης και η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους). Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (K_s) προσδιορίστηκε στον αγρό με το υδροπερατόμετρο Guelph της Soil Moisture Equipment ενώ παράλληλα έγινε εκτίμηση της τιμής της K_s, σε δύο διαφορετικά βάθη (0-30cm και 30-60cm), με την εφαρμογή του λογισμικού προγράμματος HYDRUS (2D/3D) version 1.02. Η ποσότητα του νερού που εφαρμόζονταν σε κάθε άρδευση ελέγχονταν και καταγράφονταν από μηχανικά υδρόμετρα.

Μετρήσεις της μεταβολής του ύψους των φυτών, της ξηρής βιομάζας και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας πραγματοποιούνταν στο τέλος κάθε εβδομάδας. Οι μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας πραγματοποιήθηκαν με την έμμεση μέθοδο SunScan και με άμεση μέθοδο μέσω ψηφιακών φωτογραφιών και χρήσης του λογισμικού AutoCAD. Οι μετρήσεις της ξηρής βιομάζας έγιναν επί μεμονωμένων φυτών που επιλέγονταν τυχαία έτσι ώστε να μην διαταράσσεται η πυκνότητα φυτών στο κομμάτι της κάθε επανάληψης όπου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις ύψους και δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για κάθε μία από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής. Ο συγκεκριμένος σταθμός είναι εγκατεστημένος 5m από το μέσον του πειραματικού αγρού. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν ήταν: θερμοκρασία και σχετική υγρασία ατμόσφαιρας, ηλιακή ακτινοβολία, βροχόπτωση και ταχύτητα του ανέμου.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων έγινε με γνώμονα την μεθοδολογία του εξατμισίμετρου τύπου Α. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης για τις μεταχειρίσεις στις οποίες καλύπτονταν το σύνολο των αναγκών τους σε νερό (Ε100 και Υ100). Στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά η δόση άρδευσης υπολογίστηκε ως ποσοστό της πλήρους δόσης (50% στις μεταχειρίσεις Ε50 και Υ50 και 70% στις μεταχειρίσεις Ε70 και Υ70). Στη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

μεταχείριση Α100 η δόση άρδευσης καθορίστηκε από τον ρυθμό εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας όπως αυτή καταγράφονταν από τον αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους. Το εύρος άρδευσης προαποφασίστηκε να είναι δύο ημέρες στις μεταχειρίσεις Ε100, Υ100, Ε70, Υ70, Ε50 και Υ50 ενώ στη μεταχείριση Α100 καθορίζονταν από το ρυθμό εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας. Το μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος άρδευσης για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου υπολογίστηκε από την πρακτική δόση άρδευσης λαμβάνοντας υπόψη τις υδροδυναμικές παραμέτρους του εδάφους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος άρδευσης και την μέση ημερήσια εξατμισοδιαπνοή για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου όπως αυτή έχει υπολογιστεί από παλαιότερες έρευνες του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής για την περιοχή της έρευνας. Κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009 πραγματοποιήθηκαν 21, 29 και 26 αρδεύσεις με σταγόνα αντίστοιχα.

Για την μοντελοποίηση των παραγωγικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας που μελετήθηκαν στην παρούσα έρευνα είναι η μεταβολή του ύψους του κεντρικού στελέχους του φυτού, η μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και η μεταβολή της παραγωγής ξηρής βιομάζας. Το πρόβλημα το οποίο προέκυψε ήταν πολυπαραμετρικό και εντόνως μη γραμμικό. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος το μη γραμμικό μοντέλο γραμμικοποιήθηκε με κατάλληλους μετασχηματισμούς και στη συνέχεια στο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης (Multiple Regression). Η τελική εξίσωση πρόβλεψης προέκυψε από τις μέσες τιμές των παραμέτρων και των τριών ετών της έρευνας. Το ύψος του φυτού, το LAI και η ξηρή βιομάζα αποτελούσαν τις εξαρτημένες μεταβλητές (Υ) ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άρδευση εκφρασμένη σε mm (X_1), η βροχόπτωση εκφρασμένη σε mm (X_2), η ηλιοφάνεια εκφρασμένη σε W/m^2 (X_3), η θερμοκρασία εκφρασμένη σε θερμομέρες (θερμοκρασία αναφοράς για το σόργο τους 10^oC) (X_4), η υγρασία εδάφους εκφρασμένη σε mm αποθηκευμένου και διαθέσιμου νερού στο έδαφος πριν από κάθε άρδευση (X_5), η υγρασία ατμόσφαιρας (εκφρασμένη από τον καθαρό αριθμό $\frac{e_a - e_d}{e_d}$, όπου e_a και e_d είναι η πίεση κορεσμού και η πραγματική πίεση υδρατμών, αντίστοιχα) (X_6), και η διάρκεια της ημέρας εκφρασμένη σε λεπτά της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ώρας (X_7). Η γραμμικοποίηση έγινε με την εφαρμογή λογαριθμοποίησης με βάση το φυσικό λογάριθμο (ln) σε όλες τις τιμές των παραμέτρων.

Οι μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων που παρατηρήθηκαν μεταξύ των ετών δεν ήταν σημαντικές. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιοφάνεια κυμάνθηκαν στο μέσο όρο τιμών για την περιοχή. Το ύψος της ωφέλιμης βροχόπτωσης, για τις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009, ήταν 144, 226 και 174mm για την καλλιεργητική περίοδο από 14/5 έως 20/10. Η συνολική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου τύπου Α, κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων 2007, 2008 και 2009 ήταν 753,2, 784,3 και 659,3mm αντίστοιχα.

Από τη μελέτη των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας φαίνεται ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση διατηρεί την εδαφική υγρασία σε υψηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη επιφανειακή στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Δεν παρατηρήθηκε βαθιά διήθηση κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας ενώ στη μεταχείριση Ε50 η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα κατά την περίοδο της άνθησης οπότε και το σόργο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην έλλειψη νερού. Ειδικά για τη μεταχείριση Α100 η διακύμανση της μέσης εδαφικής υγρασίας ήταν σταθερή και κυμάνθηκε μεταξύ 24% και 32%κ.ο. που ήταν και τα όρια λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος άρδευσης. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της εμβαδομέτρησης φαίνεται ότι το ριζικό σύστημα δεν επηρεάστηκε από τη συχνότητα των αρδεύσεων. Η ανάπτυξή του έφτασε έως το βάθος των 50cm τουλάχιστο δεδομένου ότι κατά την εξαγωγή από το έδαφος κάποια ριζικά τριχίδια αποκόπηκαν. Επομένως το φυτό ανέπτυξε ριζικό σύστημα τουλάχιστο έως το βάθος του υπόγειου αγωγού εφαρμογής ενώ η μέγιστη πυκνότητα ριζών παρατηρήθηκε στα 30cm. Από την εμβαδομέτρηση προέκυψε ότι η συγκεκριμένη ρίζα καλύπτει επιφάνεια 466cm^2. Το μέγιστο μήκος των ριζικών τριχιδίων έφτανε τα 50cm ενώ το μέγιστο πλάτος έφτανε τα 35cm.

Η εξοικονόμηση νερού που παρατηρήθηκε από την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων άρδευσης κατά τη διάρκεια της έρευνας ήταν σημαντική. Ο μέσος όρος εξοικονόμησης νερού μεταξύ των ζευγών μεταχειρίσεων Ε50-Υ50, Ε70-Υ70 και Ε100-Υ100 ήταν 18,7%, 16,7% και 9,4% αντίστοιχα. Επομένως, εφαρμογή της δόσης άρδευσης με το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 14,9% κατά μέσο όρο στο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

σύνολο των μεταχειρίσεων (εκτός της Α100). Ειδικά στην περίπτωση της μεταχείρισης Α100, η σύγκριση της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού με την αντίστοιχη της μεταχείρισης Ε100 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εξοικονόμηση νερού άρδευσης κατά μέσο όρο τη διετία 2008-2009, φτάνει το 7,6%. Εάν η σύγκριση γίνει μεταξύ των τελικών ποσοτήτων νερού που εφαρμόστηκαν σε κάθε μεταχείριση τότε προκύπτει ότι η μέση εξοικονόμηση νερού τη διετία 2008-2009 φτάνει το 10,1%.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά σε σύγκριση με αυτές που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης συμπεριλαμβανομένης και της μεταχείρισης Υ70. Η στατιστική επεξεργασία έδειξε ότι οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων που αρδεύτηκαν ελλειμματικά και αυτών που δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης ήταν σημαντικές για επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων LAI με τη μέθοδο SunScan και η εμβαδομέτρηση με το πρόγραμμα AutoCAD έδειξε ότι δεν υπήρχαν διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Η εξίσωση που συνδέει τις τιμές LAI που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο μεθόδων, η οποία προέκυψε από την στατιστική επεξεργασία με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, είναι $Y_{AutoCAD}$= 0,136+1,003$X_{SunScan}$ (R^2=0,986 και MSE=0,028) Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ αναμένονταν μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές LAI μεταξύ των μετρήσεων με τις δυο μεθόδους λόγω των διαφορετικών συνθηκών μέτρησης της φυλλικής επιφάνειας, εντούτοις οι διαφορές αυτές δεν παρατηρήθηκαν στην πράξη. Το γεγονός αυτό ίσως να σημαίνει ότι η γωνία που σχηματίζουν τα φύλλα του σόργου, όταν είναι προσαρτημένα στο στέλεχος, με το έδαφος τείνει να είναι μηδενική. Οι μεταχειρίσεις Ε100 και Α100 αν και δέχτηκαν διαφορετική συνολική ποσότητα νερού άρδευσης δεν παρουσίασαν διαφορές ως προς την τιμή του LAI.

Οι εξισώσεις που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης περιγράφουν πάνω από το 94% των περιπτώσεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε όλες τις μεταχειρίσεις κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η άρδευση. Αντίθετα από την στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές δεν περιγράφουν ικανοποιητικά την μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την κρισιμότητα της άρδευσης όταν οι κλιματολογικές συνθήκες δεν

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη του φυτού. Οι εξισώσεις που προέκυψαν για κάθε μεταχείριση είναι:

- E70: $Y = -5,407+1,364X_1$, $R^2=0,948$, MSE=0,032,
- A100: $Y = -4,748+1,234X_1$, $R^2=0,953$, MSE=0,033,
- Y70: $Y = -5,709+1,446X_1$, $R^2=0,957$, MSE=0,029,
- E50: $Y = -6,058+1,507X_1$, $R^2=0,942$, MSE=0,032,
- Y100: $Y = -4,955+1,278X_1$, $R^2=0,960$, MSE=0,028,
  Y100: $Y = -3,349+1,611X_1-0,862X_3$, $R^2=0,997$, MSE=0,018,
- Y50: $Y = -6,416+1,592X_1$, $R^2=0,943$, MSE=0,035,
  Y50: $Y = -0,915+4,474X_1-2,834X_5$, $R^2=0,962$, MSE=0,025,
- E100: $Y = -4,843+1,247X_1$, $R^2=0,961$, MSE=0,027,
  E100: $Y = -3,409+1,545X_1-0.769X_3$, $R^2=0,975$, MSE=0,019,

Κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ανάπτυξη των φυτών. Τα φυτά που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση ήταν ψηλότερα σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκα με επιφανειακή. Αντίστοιχα, τα φυτά που αρδεύτηκαν πλήρως παρουσίασαν μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Η μέση μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Y100 όπου τα φυτά έφτασαν σε ύψος 385cm ενώ η μέση ελάχιστη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση E50 όπου τα φυτά έφτασαν σε ύψος 252cm. Στις πλήρως αρδευόμενες μεταχειρίσεις τα φυτά φτάνουν το μέγιστο ύψος περίπου στις 110 ημέρες από τη σπορά ενώ στις ελλειμματικά αρδευόμενες περίπου 2 εβδομάδες αργότερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τάση που έχει το σόργο να μειώνει τους ρυθμούς ανάπτυξής του όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς (έλλειψη νερού) και να επανέρχεται σε κανονικούς ρυθμούς μετά την αποκατάσταση ευνοϊκών συνθηκών (μειωμένη ΕΤ το μήνα Σεπτέμβριο παράλληλα με αύξηση των βροχοπτώσεων). Επομένως, καθίσταται σαφές ότι εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την ανάπτυξη του φυτού.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε ότι οι εξισώσεις πρόβλεψης του ύψους κεντρικού στελέχους του φυτού περιγράφουν σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων ($R^2\approx1$). Επιπλέον φαίνεται καθαρά ότι το ύψος των φυτών εξαρτάται από την άρδευση και μόνο. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η άρδευση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη του σόργου. Οι εξισώσεις που προέκυψαν για κάθε μεταχείριση είναι:

- E70: $Y = -1,757+1,222X_1$, $R^2=0,996$, MSE=0,004,
- A100: $Y = -1,430+1,151X_1$, $R^2=0,997$, MSE=0,004,

  A100: $Y = -2,274+0,790X_1+0,667X_6$, $R^2=0,999$, MSE=0,002,
- Y70: $Y = -2,208+1,331X_1$, $R^2=0,997$, MSE=0,004,

  Y70: $Y = -0,444+2,034X_1-0,761X_5$, $R^2=0,998$, MSE=0,003,
- E50: $Y = -1,747+1,230X_1$, $R^2=0,996$, MSE=0,003,
- Y100: $Y = -1,810+1,227X_1$, $R^2=0,997$, MSE=0,005,

  Y100: $Y = -0,174+1,747X_1-0,619X_5$, $R^2=0,998$, MSE=0,003,
- Y50: $Y = -2,350+1,370X_1$, $R^2=0,993$, MSE=0,007,
- E100: $Y = -1,482+1,159X_1$, $R^2=0,998$, MSE=0,002.

Η μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης και δέχτηκαν πλήρη δόση άρδευσης. Η μέση μέγιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Y100 (≈4300Kg/στρ.). Η μεγάλη απόδοση σε ξηρή βιομάζα που παρατηρήθηκε στην συγκεκριμένη μεταχείριση κυρίως οφείλεται στην δόση άρδευσης αλλά και στις μειωμένες απώλειες από εξάτμιση και επιφανειακή απορροή. Παράλληλα, η δυνατότητα του φυτού να εκμεταλλεύεται τις χορηγούμενες ποσότητες νερού αποδοτικά είχε σαν αποτέλεσμα οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης να ελαχιστοποιούνται αλλά να χρησιμοποιείται αποδοτικότερα και νερό που αποθηκεύονταν σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους (κάτω από τα 60cm). Ο μέσος όρος παραγωγής των μεταχειρίσεων E100, A100 και Y70 κυμάνθηκε μεταξύ 3700 και 3900Kg/στρ. Η ελάχιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις E70, Y50 και E50. Η μέση ελάχιστη τιμή βιομάζας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση E50 (≈2470Kg/στρ.). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της τριετούς έρευνας οι μεταχειρίσεις E70, Y50 και E50 έδωσαν ικανοποιητική απόδοση κυρίως λόγω της ικανότητας του σόργου να εισέρχεται σε κατάσταση μειωμένης διαπνοής ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις ανάγκες του σε νερό. Αυτό είχε ως συνέπεια η μέγιστη τιμή βιομάζας σε αυτές τις μεταχειρίσεις να παρατηρείται περίπου 15-20 ημέρες αργότερα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, οι οποίες παρουσίαζαν μέγιστη παραγωγή περίπου το δεύτερο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου (120-130 ημέρες από τη σπορά). Επομένως, καθίσταται σαφές ότι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την παραγωγή βιομάζας. Ειδικά στις μεταχειρίσεις Ε100 και Α100 δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά τη διετία 2008-2009 όταν και εφαρμόστηκε πλήρως η αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε ότι οι εξισώσεις πρόβλεψης παραγωγής ξηρής βιομάζας περιγράφουν πάνω από το 95% των περιπτώσεων (R^2>0,95). Επιπλέον φαίνεται καθαρά, όπως και στην περίπτωση του ύψους των φυτών, ότι η ξηρή βιομάζα εξαρτάται από την άρδευση και μόνο. Επιβεβαιώνεται δηλαδή η άποψη ότι η απόδοση των φυτών, όπως και του σόργου, αυξάνεται όσο αυξάνεται η άρδευση και επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος. Ειδικά για το σόργο φαίνεται ότι η απόδοση σε βιομάζα μεγιστοποιείται όταν μεγιστοποιείται η ποσότητα άρδευσης. Οι εξισώσεις που προέκυψαν για κάθε μεταχείριση είναι:

- Ε70: $Y = -1,036+1,488X_1$, $R^2=0,967$, MSE=0,007,
- Α100: $Y = -1,323+1,524X_1$, $R^2=0,982$, MSE=0,004,
- Υ70: $Y = -0,960+1,520X_1$, $R^2=0,973$, MSE=0,006,
- Ε50: $Y = -0,259+1,356X_1$, $R^2=0,995$, MSE=0,001,
- Υ100: $Y = 1,247+1,126X_1$, $R^2=0,968$, MSE=0,005,
- Υ50: $Y = -0,687+1,471X_1$, $R^2=0,991$, MSE=0,002,
- Ε100: $Y = -0,747+1,429X_1$, $R^2=0,982$, MSE=0,005

  Ε100: $Y = 0,250+2,905X_1-2,186X_6$, $R^2=0,993$, MSE=0,002.

Η παραγωγή ενέργειας επηρεάστηκε κατά παρόμοιο τρόπο με την παραγωγή ξηρής βιομάζας από την εφαρμογή των διαφορετικών δόσεων και μεθόδων άρδευσης. Παρατηρήθηκε η τάση τα ζεύγη των μεταχειρίσεων Υ70-Ε100 και Υ50-Ε70 να δίνουν παρόμοια παραγωγή ενέργειας ως αποτέλεσμα και της παρόμοιας παραγωγής βιομάζας. Το γεγονός αυτό δείχνει για ακόμη μια φορά ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης. Η μεταχείριση που έδωσε την μέγιστη παραγωγή ενέργειας ήταν η Υ100 η οποία παρήγαγε περισσότερη ενέργεια, κατά μέσο όρο, 28,0%, 11,7%, 14,4%, 42,5%, 28,2% και 9,2% περισσότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100, Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα. Αντίθετα η μεταχείριση που έδωσε την ελάχιστη παραγωγή ήταν η Ε50 και παρήγαγε λιγότερη ενέργεια, κατά μέσο όρο, 20,1%, 34,9%, 33,0%, 42,5%, 20,0% και 36,7% λιγότερο σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Ε70, Α100,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Υ70, Ε50, Υ50 και Ε100 αντίστοιχα. Μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 δεν παρατηρούνται διαφορές ως προς την παραγωγή ενέργειας.

Το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό για το σύνολο των μεταχειρίσεων. Μια τάση υπεροχής φαίνεται να παρουσιάζει η μεταχείριση Υ70 η οποία δίνει μεγαλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο κατά 4,1%, 9,0%, 7,0%, 5,2%, 0,5% και 1,3% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Α100, Ε50, Ε70, Ε100, Υ50 και Υ100 αντίστοιχα. Οι μεταχειρίσεις που έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή βιομάζας δεν παρουσίασαν αντίστοιχα και μεγαλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο. Η ενέργεια που εξοικονομείται λόγω της μειωμένης δόσης άρδευσης και η σημαντική παραγωγή βιομάζας που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ70 ήταν οι δύο παράγοντες που επέδρασαν θετικά στη διαμόρφωση του υψηλού ενεργειακού ισοζυγίου στη συγκεκριμένη μεταχείριση. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταχείριση Ε50 στην οποία το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό και αρκετά υψηλό παρόλο που οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό καλύφθηκαν μόνο κατά το 50%.

Περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται κυρίως για τη μεταφορά και τη μεταποίηση της βιομάζας σε μπριγκέτες και δευτερευόντως για την άρδευση. Ειδικότερα, εξετάζοντας την άρδευση (καταιονισμός, επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση) ως προς την κατανάλωση ενέργειας προκύπτει ότι αυτή αποτελεί ποσοστό 27,4%, 26,1%, 27,2%, 28,7%, 23,2%, 24,5% και 27,1% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας στις μεταχειρίσεις Α100, Ε50, Ε70, Ε100, Υ50, Υ70 και Υ100 αντίστοιχα. Η μείωση της ποσότητας στάγδην άρδευσης κατά 50% (μεταχειρίσεις Ε50 και Υ50) συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας για άρδευση σε ποσοστό 37,9% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Α100, Ε100 και Υ100 (μέσες τιμές). Αντίστοιχα, μείωση της άρδευσης κατά 30% (μεταχειρίσεις Ε70 και Υ70) συμβάλει σε εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 21,5% σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Α100, Ε100 και Υ100 (μέσες τιμές). Επομένως, καθίσταται σαφές ότι εφαρμογή της ελλειμματικής άρδευσης στο φυτό σόργο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, στη μεταχείριση Α100 παρατηρείται μειωμένη κατανάλωση ενέργειας κατά 1,3% σε σύγκριση με τη μεταχείριση Ε100 που προέρχεται κυρίως από την εξοικονόμηση νερού άρδευσης και επομένως από το μικρότερο χρόνο λειτουργίας του συστήματος συνολικά.

Από τη μελέτη της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) προκύπτει ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

άρδευσης. Μεταξύ των μεταχειρίσεων, η αποδοτικότητα χρήσης νερού ήταν μεγαλύτερη στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά. Τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 η μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ70.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων ως προς την ακαθάριστη πρόσοδο έδειξε ότι παρουσιάστηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια και των τριών καλλιεργητικών περιόδων. Στην υπόγεια στάγδην άρδευση η ακαθάριστη πρόσοδος ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη έρευνας. Σημαντικά μικρότερη τιμή ακαθάριστης προσόδου παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (ΕΤ) ενώ σημαντικά μεγαλύτερη ήταν στην μεταχείριση Υ100 (υπόγεια στάγδην άρδευση με δόση ίση με το 100% της ΕΤ). Ειδικότερα, μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100, στις οποίες η δόση άρδευσης καθορίζονταν από αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας και εξατμισίμετρο τύπου Α, αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την ακαθάριστη πρόσοδο σε καμία από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.

Διαφορές παρατηρήθηκαν και ως προς τις άμεσες δαπάνες για κάθε μέθοδο άρδευσης (αυτοματοποιημένη, επιφανειακή, υπόγεια στάγδην άρδευση) και για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η μέση τιμή του συνόλου των άμεσων δαπανών για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Εντός της κάθε καλλιεργητικής περιόδου, οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων άρδευσης οφείλονταν στο διαφορετικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, στις διαφορετικές καλλιεργητικές εργασίες που εφαρμόστηκαν, στις διαφορετικές αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα και στις διαφορετικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν την κάθε καλλιεργητική περίοδο, ως αποτέλεσμα των κλιματικών συνθηκών, και άρα του διαφορετικού κόστους χρήσης νερού άρδευσης. Διαφορές ως προς τις άμεσες δαπάνες παρατηρήθηκαν και μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Οι αντίστοιχες διαφορές μεταξύ των ετών οφείλονταν στο διαφορετικό κόστος εργατικών χεριών (χειρονακτική ζιζανιοκτονία) και στο διαφορετικό κόστος χρήσης νερού ως αποτέλεσμα των διαφορετικών απαιτήσεων της καλλιέργειας όπως αυτές καθορίζονταν από τους κλιματικούς παράγοντες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Το άμεσο κόστος παραγωγής για κάθε μέθοδο άρδευσης διαφοροποιούνταν για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η τιμή του για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με την επιφανειακή για κάθε μια από τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους 2007, 2008 και 2009. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων οφείλονταν στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας, στο διαφορετικό κόστος χρήσης αρδευτικού νερού ως αποτέλεσμα των διαφορετικών ποσοτήτων νερού, στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού των επεμβάσεων χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας. Σημαντικά μεγαλύτερο άμεσο κόστος παραγωγής παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ ενώ σημαντικά μικρότερο στη μεταχείριση Υ100 κυρίως λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ξηρής βιομάζας. Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής δεν παρατηρούνται μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ.

Η μέση τιμή του άμεσου κόστους νερού για την αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους (επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση) και για τα τρία έτη της έρευνας. Σημαντικά μεγαλύτερο άμεσο κόστος νερού παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά με δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ ενώ σημαντικά μικρότερο στη μεταχείριση Υ100. Οι διαφορές οφείλονταν στη διαφορετική παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο εντός του ίδιου έτους όσο και μεταξύ των τριών ετών της έρευνας και στο διαφορετικό κόστος εργασίας μεταξύ των ετών λόγω μείωσης του αριθμού χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας. Διαφορές ως προς το άμεσο κόστος νερού παρατηρούνται και μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων αυτών κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2008 και 2009 οφείλεται στο γεγονός ότι στη μεταχείριση Α100 εξοικονομήθηκε περίπου διπλάσια ποσότητα νερού το 2008 σε σύγκριση με αυτή που εξοικονομήθηκε την περίοδο 2009.

Η προσπάθεια υπολογισμού του άμεσου κόστους νερού έγινε για να διαπιστωθεί κατά πόσο καθίσταται συμφέρουσα μια σημαντική επένδυση σε αγορά εξοπλισμού σε συνάρτηση με την διαθεσιμότητα νερού άρδευσης. Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι στην περίπτωση που υπάρχει επάρκεια νερού άρδευσης για πλήρη κάλυψη των αναγκών μιας καλλιέργειας τότε το κόστος είναι χαμηλό και επομένως η επένδυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρότερο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

κίνδυνο αποτυχίας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει επάρκεια νερού άρδευσης τότε αυξάνεται ο κίνδυνος η επένδυση να αποτύχει. Επομένως, ο επενδυτής θα πρέπει να στραφεί σε διαφορετική επένδυση ή να οργανώσει κατά τέτοιο τρόπο τις καλλιεργητικές πρακτικές που θα εφαρμόσει έτσι ώστε ο όποιος κίνδυνος αποτυχίας της επένδυσης να ελαχιστοποιηθεί.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, το ακαθάριστο κέρδος για κάθε μέθοδο άρδευσης και για κάθε καλλιεργητική περίοδο διαφοροποιούνταν, επίσης. Η τιμή του για την υπόγεια στάγδην άρδευση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή και για τα τρία έτη της έρευνας. Οι διαφορές οφείλονταν κυρίως στην μεγαλύτερη παραγωγή ξηρής βιομάζας που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις οι οποίες αρδεύτηκαν με το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την αντίστοιχη παραγωγή ξηρής βιομάζας από τις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με επιφανειακή στάγδην άρδευση. Οι μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 50% της ΕΤ απέδωσαν μικρότερη ποσότητα ξηρής βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους ανεξάρτητα από τη μέθοδο άρδευσης που εφαρμόστηκε. Αντίθετα, οι μεταχειρίσεις που δέχτηκαν δόση άρδευσης ίση με το 100% της ΕΤ με το σύστημα της υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης απέδωσαν τη μέγιστη ποσότητα ξηρή βιομάζας και το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και για τις τρείς καλλιεργητικές περιόδους.

Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το ακαθάριστο κέρδος μεταξύ των μεταχειρίσεων Α100 και Ε100 της ΕΤ. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι στη μεταχείριση Α100 το ακαθάριστο κέρδος ήταν θετικό και τις δύο καλλιεργητικές περιόδους που εφαρμόστηκε πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση (2008-2009) ενώ την καλλιεργητική περίοδο 2007 κατά την οποία δεν είχε εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση το ακαθάριστο κέρδος ήταν αρνητικό και μικρότερο από το αντίστοιχο της μεταχείρισης Ε100 (επιφανειακή στάγδην άρδευση με δόση 100 της ΕΤ).

Σε μια προσπάθεια περαιτέρω επέκτασης της έρευνας υπολογίστηκε το σημείο οικονομικού ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων. Με τον όρο αυτό περιγράφεται η κατάσταση κατά την οποία η ακαθάριστη πρόσοδος και οι άμεσες δαπάνες παραγωγής έχουν την ίδια τιμή. Για τον υπολογισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων έγινε παραδοχή ότι η τιμή των άμεσων δαπανών παραγωγής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ισούται με την μέση τιμή των μέγιστων δαπανών παραγωγής κατά την τριετία της έρευνας. Επίτευξη μέσης παραγωγής μεγαλύτερης από 3652,3Kg/στρ. καθιστά την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου επικερδή για τις συνθήκες της Θεσσαλίας.

Ειδικά για την πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση, το σημείο ισοσκελισμού διαφοροποιείται ελαφρώς λόγω του κόστους του επιπλέον εξοπλισμού. Για τον υπολογισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων στην περίπτωση της μεταχείρισης Α100 έγινε παραδοχή ότι η τιμή των άμεσων δαπανών παραγωγής ισούται με την μέση τιμή των μέγιστων δαπανών παραγωγής κατά την τριετία της έρευνας (246,2€/στρ.).Όπως προκύπτει από τον ορισμό του σημείου ισοσκελισμού εσόδων-εξόδων, η παραγωγή ξηρής βιομάζας που πρέπει να επιτευχθεί είναι 3787,7kg/στρ. όταν η τιμή προϊόντος είναι 0,065€/Kg. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ποσότητα ξηρής βιομάζας που παράχθηκε την τριετία 2007-2009 (3805,0Kg) είναι μεγαλύτερη από 3787,7kg/στρ. και επομένως η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου είναι επικερδής για τις συνθήκες της Θεσσαλίας όταν εφαρμόζεται πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης.

Η καλλιέργεια του σόργου στην Ελλάδα μπορεί να αποφέρει ακόμη σημαντικότερα κέρδη στον παραγωγό όταν με την εφαρμογή κατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών μειωθούν οι δαπάνες παραγωγής. Μια τέτοια καλλιεργητική πρακτική είναι να εφαρμοστεί συνδυασμός μιας χημικής ζιζανιοκτονίας αμέσως μετά τη σπορά και πριν το φύτρωμα της καλλιέργειας και μιας μηχανικής ή χειρονακτικής ζιζανιοκτονίας όταν τα φυτά βρίσκονται στο στάδιο των τριών φύλλων (ύψος περίπου 20cm). Από το στάδιο αυτό και έπειτα το φυτό αναπτύσσεται ραγδαία, ανταγωνιζόμενο έντονα τα ζιζάνια που πιθανώς εμφανίζονται. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι εάν εφαρμοστεί η τεχνική αυτή τότε το όφελος του παραγωγού ανέρχεται στα 55€/στρ.

Μια δεύτερη καλλιεργητική πρακτική που θα μπορούσε να εφαρμοστεί είναι η μείωση της δόσης άρδευσης. Εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης και ταυτόχρονη μείωση της δόσης κατά 30% της ΕΤ (μεταχείριση Υ70) εξασφαλίζει μέση παραγωγή ξηρής βιομάζας μεγαλύτερη από 3527,7Kg/στρ. Η μείωση της δόσης άρδευσης συνεπάγεται μείωση του κόστους χρήσης νερού. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι αν εφαρμοστεί η τεχνική αυτή τότε το όφελος για τον παραγωγό ανέρχεται στα 8€/στρ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με κατάλληλες καλλιεργητικές πρακτικές είναι δυνατό να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος από την καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου. Εάν εφαρμοστεί συνδυασμός καλλιεργητικών τεχνικών μείωσης του κόστους παραγωγής με κατάλληλο εξοπλισμό πλήρους αυτοματοποίησης τότε το κέρδος για τον παραγωγό αυξάνεται και μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει τα 60€/στρ. χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το όποιο κέρδος από την πώληση του προϊόντος. Εάν σε όλα τα παραπάνω συνυπολογιστεί το τεράστιο περιβαλλοντικό όφελος από την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και την διατήρηση σταθερού του ισοζυγίου διοξειδίου του άνθρακα τότε γίνεται άμεσα αντιληπτό γιατί η καλλιέργεια του ενεργειακού φυτού σόργου θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη καλλιέργεια ιδιαίτερα υπό συνθήκες εφαρμογής γεωργίας χαμηλών εισροών, ελλειμματικής άρδευσης και εφαρμογής νέων τεχνολογιών πλήρους αυτοματοποίησης των αρδεύσεων.

11.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια προσπάθεια πρακτικής επεξήγησης των συμπερασμάτων τα οποία προέκυψαν κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας.

Στις ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις η υπόγεια στάγδην άρδευση συνέβαλε στη διατήρηση της εδαφικής υγρασίας σε υψηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με την αντίστοιχη επιφανειακή. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις μειωμένες απώλειες νερού, οι οποίες οφείλονται στην επιφανειακή απορροή και εξάτμιση. Επιπλέον, η εδαφική υγρασία στο ενεργό ριζόστρωμα κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν υπογείως σε σύγκριση με τις επιφανειακές. Το ενεργό ριζόστρωμα αναπτύχθηκε σε βάθος μόλις 30cm λόγω της συμπίεσης του συγκεκριμένου εδάφους.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας και από την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων άρδευσης, παρατηρήθηκε εξοικονόμηση νερού. Η εξοικονόμηση νερού άρδευσης με την εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης οφείλεται στις μειωμένες απώλειες λόγω εξάτμισης και επιφανειακής απορροής αλλά και στην απουσία βαθιάς διήθησης εξαιτίας της εφαρμογής μειωμένων δόσεων άρδευσης (ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις) και των μικρών επαναλαμβανόμενων δόσεων άρδευσης (πλήρως αρδευόμενες μεταχειρίσεις). Στην μεταχείριση Α100 η εξοικονόμηση νερού προήλθε από το γεγονός ότι ο αισθητήρας μέτρησης εδαφικής υγρασίας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

λάμβανε υπόψη την μεταβολή της εδαφικής υγρασίας και με αυτό το λόγο το έδαφος τροφοδοτούνταν με την απαιτούμενη ποσότητα νερού άρδευσης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη τυχόν πλεονάζον νερό για την κάλυψη απωλειών του συστήματος άρδευσης ή τυχόν σφαλμάτων στις μετρήσεις της εξάτμισης από το εξατμισίμετρο τύπου Α ή την χρήση φυτικού συντελεστή που πιθανώς να μην περιέγραφε ικανοποιητικά την ανάπτυξη του φυτού και επομένως και τις ανάγκες του σε νερό. Η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού ήταν μεγαλύτερη στις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά και οφείλεται τόσο στους παραπάνω λόγους αλλά επιπροσθέτως η υπόγεια στάγδην άρδευση συμβάλει στην αύξηση της διαλυτότητας των θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται στο βάθος του ενεργού ριζοστρώματος και επομένως στην ταχύτερη απορρόφησή τους από τις ρίζες του φυτού.

Η ανάπτυξη και η παραγωγικότητα του σόργου επηρεάστηκε από την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων άρδευσης. Γενικά, παρατηρήθηκε ότι οι μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν με υπόγεια στάγδην άρδευση υπερείχαν έναντι των επιφανειακών κυρίως λόγω της αποδοτικότερης εφαρμογής του νερού άρδευσης για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Ειδικότερα, το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την τάση οι μεταχειρίσεις Υ50 – Ε70, Υ70 – Ε100 να παράγουν παρόμοια ποσότητα ξηρής βιομάζας κατά τη διάρκεια και των τριών καλλιεργητικών περιόδων. Η υψηλή παραγωγή ξηρής βιομάζας και ενέργειας που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση Υ50 οφείλεται στο γεγονός ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση διατήρησε την εδαφική υγρασία σε τιμές πάνω από την άμεσα διαθέσιμη εδαφική υγρασία για όλη σχεδόν την καλλιεργητική περίοδο και ιδιαίτερα κατά την περίοδο της άνθισης οπότε και το σόργο παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευαισθησία στην καταπόνηση από την έλλειψη νερού. Επιπλέον το γεγονός ότι το πρόγραμμα στάγδην άρδευσης άρχιζε στα τέλη Ιουνίου συνέβαλε στην προσαρμογή των φυτών στις συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα φυτά απέκτησαν αντοχή στην μειωμένη άρδευση και διαμόρφωσαν κατάλληλα τις βιολογικές τους δραστηριότητες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντιμετωπιστεί η καταπόνηση από την έλλειψη υγρασίας. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την πολύ ικανοποιητική παραγωγή ξηρής βιομάζας που πέτυχαν οι μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν ελλειμματικά την καλλιεργητική περίοδο 2008. Αναλυτικότερα, την συγκεκριμένη περίοδο η κατανομή των βροχοπτώσεων και η σχεδόν πλήρης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

έλλειψή τους συνέβαλλαν στην προσαρμογή των φυτών στις χορηγούμενες δόσεις άρδευσης. Αντίθετα, τις περιόδους 2007 και 2009 η εμφάνιση σημαντικών βροχοπτώσεων εντός της αρδευτικής περιόδου ανέτρεψαν την προσαρμογή των φυτών στην ελλειμματική άρδευση και τα εξέθεσαν σε δυσμενείς εναλλαγές υγρών και πολύ ξηρών περιόδων επηρεάζοντας την ομαλή ανάπτυξη και παραγωγή τους.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων (LAI, ύψος και παραγωγή βιομάζας) με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε ότι κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η άρδευση για όλες τις μεταχειρίσεις. Γενικά, το σόργο είναι ένα φυτό το οποίο δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε άρδευση δίνοντας ικανοποιητική παραγωγή βιομάζας ακόμη και υπό συνθήκες έλλειψης νερού έχοντας την ικανότητα να προσαρμόζει τις βιολογικές του λειτουργίες (κλείσιμο των στομάτων των φύλλων, μείωση της διαπνοής) όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς. Παράλληλα δεν είναι απαιτητικό σε θρεπτικά, ορισμένα από τα οποία υπάρχουν σε επάρκεια στο έδαφος ενώ άλλα υπάρχουν διαλυμένα στο νερό άρδευσης (ιχνοστοιχεία). Επομένως, η δόση άρδευσης συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη και παραγωγή του συγκεκριμένου φυτού όταν επιπλέον οι κλιματικές συνθήκες δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα. Ωστόσο σε ορισμένες μεταχειρίσεις, επιπλέον της δόσης άρδευσης, κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν η βροχόπτωση, η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία και η υγρασία της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, η περιεχόμενη εδαφική υγρασία αποτελούσε κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή κυρίως σε ελλειμματικά αρδευόμενες μεταχειρίσεις, γεγονός που σημαίνει ότι ο τύπος του εδάφους συμβάλει στην αποθήκευση και διάθεση ποσότητας νερού επηρεάζοντας την ανάπτυξη και παραγωγή βιομάζας του σόργου.

Τέλος οι οικονομικές παράμετροι που μελετήθηκαν επηρεάζονται από την παραγόμενη ποσότητα βιομάζας αλλά και από την καλλιεργητική πρακτική που εφαρμόζεται. Καλλιεργητικές πρακτικές που συνδυάζουν χρήση εργατικών χεριών και περιορισμένο αριθμό χημικών επεμβάσεων για τον έλεγχο των ζιζανίων δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα διότι το σόργο είναι ένα φυτό ταχείας ανάπτυξης το οποίο ανταγωνίζεται έντονα τα ζιζάνια που τυχόν εμφανίζονται μετά το στάδιο των πέντε φύλλων ή όταν το φυτό αναπτύξει μέσο ύψος 30-50cm.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

11.3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Κατά τη διάρκεια της έρευνας προέκυψαν διάφορα ερωτήματα σχετικά με την εφαρμογή πλήρους αυτοματοποιημένης στάγδην άρδευσης, ελεγχόμενης από αισθητήρα μέτρησης εδαφικής υγρασίας, τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση. Επομένως, θα μπορούσε:

- Να εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση, με αισθητήρα μέτρησης υγρασίας εδάφους με εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης αντί της επιφανειακής που εφαρμόστηκε.
- Να εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση με τοποθέτηση του αισθητήρα δίπλα στον αγωγό εφαρμογής στο μέσον της ισαποχής μεταξύ δύο διαδοχικών σταλακτήρων.
- Να εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση μειώνοντας το βάθος εδάφους στο οποίο γίνεται καταγραφή της περιεχόμενης υγρασίας.
- Να εφαρμοστεί συνδυασμός περισσότερων του ενός αισθητήρων για καταγραφή εδαφικής υγρασίας σε εδάφη με διαφορετικές υδροδυναμικές παραμέτρους και μελέτη του βέλτιστου μοντέλου που μεγιστοποιεί την απόδοση σε όλα τα επιμέρους αγροτεμάχια συνδυάζοντας τεχνικές όπως η διακοπτόμενη άρδευση ή άλλες.
- Να εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη στάγδην άρδευση λαμβάνοντας υπόψη διάφορα ποσοστά διαβροχής του εδάφους πέραν του μέγιστου (100%) που εφαρμόστηκε.
- Να εφαρμοστεί πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους άρδευσης όπως είναι ο συμβατικός καταιονισμός ή ο καταιονισμός με καταιονιστήρες χαμηλής ενέργειας και μεγάλης ακρίβειας (Low Energy Precision Applicators, LEPA) και να γίνει σύγκριση με την επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση.

Συμπληρωματικά θα μπορούσε να προταθεί:

- Εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης εδαφικής υγρασίας για τον προσδιορισμό του βάθους ριζοστρώματος των καλλιεργειών.
- Εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης για φύτρωμα καλλιεργειών με τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής σε διάφορα βάθη του εδάφους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

- Εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης με τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής σε διάφορα βάθη του εδάφους για την μελέτη της επίδρασης των μηχανικών κατεργασιών στους αγωγούς εφαρμογής.
- Εφαρμογή υπόγειας στάγδην άρδευσης για τον ακριβή προσδιορισμό βλαβών με χρήση ραδιοκυμάτων (Radar).
- Εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με την χρήση του προγράμματος AutoCAD σε περιπτώσεις ελλειμματικής άρδευσης ή περιπτώσεις μη πλήρους κάλυψης του εδάφους λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας.
- Υπολογισμός του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με χρήση ψηφιακών φωτογραφιών και προγραμμάτων που υπάρχουν διαθέσιμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαρδαβάκης, Μ. 1994. Συστηματική Βοτανική (Κρυπτόγαμα-Σπερματόφυτα). 4η Έκδοση. Εκδόσεις Σαλονικίδη. pp. 550-551.

Βύρλας, Π. 2007. Εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων άρδευσης και επίδραση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Διδακτορική διατριβή. pp. 1-12.

Δέρκας, Ν. και Καραντούνιας, Γ. 2003. Μεθοδολογία ανάταξης και εκσυγχρονισμού των συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση. Πρακτικά 9ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ),2-5 Απριλίου. pp. 207-215.

Εθνική Στατιστική Υπηρεσία. 2000. Απογραφή Γεωργίας/Κτηνοτροφίας.

Θανασουλόπουλος. Κ. 1995. Μυκητολογικές Ασθένειες Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη. pp. 16-96.

Καραντούνιας, Γ. και Δέρκας, Ν. 2000. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εγγειοβελτιωτικών έργων Πηνειού Ηλείας στον προστατευόμενο βιότοπο της λιμνοθάλασσας Κοτυχίου και τα έργα αποκατάστασής του. Πρακτικά 2ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, (ΕΓΜΕ), Βόλος 28-30 Σεπτεμβρίου. pp. 598-605.

Καράταγλης , Σ.Σ. 1999. Φυσιολογία φυτών. 3η Έκδοση. Εκδόσεις ART OF TEXT, Θεσσαλονίκη. pp. 128-135.

Κατής, Ν. και Αυγελής, Α. 1997. Ιολογικές Ασθένειες Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας. Εκδόσεις ΑΓΡΟΤΥΠΟΣ Α.Ε. Αθήνα. pp. 117-143.

Κιτσοπανίδης, Ι.Γ. και Καμενίδης, Θ.Χ. 1992. Αγροτική Οικονομική. 2η Έκδοση. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.15-43, 104-105.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Κιτσοπανίδης Γ. και Καμενίδης Χ. 2003. Αγροτική Οικονομική, Γ΄ Έκδοση, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Κιτσοπανίδης Γ. 2006. Οικονομική Ζωικής Παραγωγής: Αρχές, Εφαρμογές Τεχνικοοικονομική Ανάλυση, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Μήτσιος Κ.Ι., Τούλιος, Γ.Μ., Χαρούλης, Αθ., Γάτσιος, Φ. και Φλωράς, Στ. 2000. Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα. pp. 6-42.

Μπάτζιος Χ. 2001. Οικονομία Ζωικής Παραγωγής, Τεύχος Α΄. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη.

Μυγδάκος, Ε., Ρεζίτης, Α. και Κελεπούρης, Χ. 2009. Οικονομικότητα και αποτελεσματικότητα ενεργειακών καλλιεργειών στο νόμο Αιτωλοακαρνανίας: Αποτελέσματα καλλιεργητικής περιόδου 2006-2007. Πρακτικά 6ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 8-10 Οκτωβρίου. pp. 415-422.

Παπαζαφειρίου, Ζ., 1994. Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, pp. 196-217.

Παπαζαφειρίου, Γ.Ζ., 1997. Το νερό και το έδαφος. Εμπεριέχεται στων Τερζίδη, Γ.Α. και Παπαζαφειρίου, Γ.Ζ. Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, pp. 52-65.

Παπαζαφειρίου, Γ.Ζ. 1999. Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη. pp. 3-291.

Παπακώστα, Δ. 1996. Σημειώσεις Ειδικής Γεωργίας Ι (Σιτηρά, Ψυχανθή, Χορτοδοτικά Φυτά). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. pp. 178-181.

Παπαναγιώτου Ε. 2008. Οικονομική Ζωικής Παραγωγής, Εκδόσεις Γράφημα, Θεσσαλονίκη.

Παπανικολάου, Χ. και Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. 2009ε. Ενεργειακή αξιολόγηση της καλλιέργειας σόργου στην κεντρική Ελλάδα. Πρακτικά 6ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 8-10 Οκτωβρίου, Θεσσαλονίκη, pp. 707-714.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Τερζίδης, Γ., Τζιμόπουλος, Χ. και Δέλλιος, Μ. 1994. Προσδιορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πειραματικού αγρού πεδιάδας Θεσσαλονίκης . Υδροτεχνικά 2: 455-465.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. Τζιμόπουλος, Χ. και Καλφούντζος, Δ. 1997. Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τη μέθοδο TDR και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων. Πρακτικά 7ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), Πάτρα, pp. 184-192.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Καλφούντζος, Δ. και Παπανίκος, Ν. 2000. Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων. Πρακτικά 2ου Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, pp. 157-164.

Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., Τέντας, Ι., Κολιού, Α., Καλφούντζος , Δ. και Παπανίκος, Ν. 2003α. Άρδευση πράσινου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Πρακτικά 3ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 29-31 Μαΐου, Θεσσαλονίκη, pp. 265-272.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Παπαλέξης Δ., Δαναλάτος Ν., Βουλτσάνης Π., Νάκος Ν., 2003β. Επίδραση επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή της ενεργειακής καλλιέργειας του σόργου στην Κεντρική Ελλάδα. Πρακτικά 9ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, pp. 183-190

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Βαρδούλη Β., Βύρλας Π., Κολιού Α. και Παπανίκος Ν., 2004. Επαναχρησιμοποίηση υγρών αστικών αποβλήτων για άρδευση πρασίνου. Πρακτικά 1ου Πανελλήνιου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου, 7-9 Μαίου, Ορεστιάδα, pp. 279-286.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Βαρδούλη Β., Βυρλας Π., 2005. Άρδευση πρασίνου με τη χρήση υγρών αστικών αποβλήτων. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 6-9 Απριλίου, Ξάνθη, pp. 557-562.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Παπαδάκης, Ε., Παπανίκος, Ν. και Παπαλέξης, Δ. 2006α. Υπόγεια άρδευση του ενεργειακού φυτού σόργου με υγρά αστικά

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

απόβλητα. Πρακτικά Πανελλήνιου συνεδρίου Μονάδες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας, Πορταριά, pp. 449-456.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Βλάχος, Β. και Παπανικολάου, Χ. 2006β. Επίδραση διαφορετικών διατάξεων στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση του βάμβακος. Πρακτικά 10ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 13-16 Δεκεμβρίου, Ξάνθη, pp. 637-644.

Σακελαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Παπαδάκης, Ε. 2006γ. Υπόγεια άρδευση του ενεργειακού φυτού σόργου με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Πρακτικά 10ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 13-16 Δεκεμβρίου, Ξάνθη, pp. 645-652.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Χ. Παπανικολάου, Σ. Πατελοδήμου, 2007α. Υπόγεια άρδευση σε καλλιέργεια βαμβακιού με διαφορετικές δόσεις άρδευσης. Πρακτικά 5ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 18-20 Οκτωβρίου Λάρισα. pp. 173-180.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Δημοπούλου, Κ. και Βούλγαρης, Θ. 2007β. Σύγκριση επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων. Πρακτικά 5ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα. pp. 181-188.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Παπανικολάου, Χ., Τζιμόπουλος, Χ. 2009α. Εφαρμογή ευφυών συστημάτων άρδευσης σε ενεργειακά φυτά. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου, 11ου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και 7ου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 27-30 Μαΐου, Βόλος, pp. 321-328.

Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Μυγδάκος, Ε. και Παπανικολάου, Χ. 2009β. Οικονομικά αποτελέσματα από την εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης. Πρακτικά 6ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 8-10 Οκτωβρίου, Θεσσαλονίκη, pp .383-390

Σταμόπουλος, Κ.Δ. 1995. Έντομα αποθηκών μεγάλων καλλιεργειών και λαχανικών. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη. pp. 129-136.

Σφήκας, Γ.Α., 1988. Γενική Γεωργία. Εκδόσεις: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη. pp. 153-245.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Σφήκας, Γ.Α., 1991. Ειδική Γεωργία Ι. Σιτηρά, Ψυχανθή και Χορτοδοτικά Φυτά. Εκδόσεις: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη. pp. 124-134.

Τζιμόπουλος, Χ., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Γιαννόπουλος, Σ. 1996. Πειραματικές μετρήσεις και στατιστική ανάλυση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στον αφρό. Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου "Εγγειοβελτιωτικά Έργα – Διαχείριση υδατικών πόρων – Εκμηχάνιση γεωργίας", ΓΕΩ.ΤΕ.Ε., Λάρισα, 24-27 Απριλίου, Τόμος Β: 868-877.

Τζιμόπουλος, Χ., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Γιαννόπουλος, Σ. 2000. Μελέτη της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο ύπαιθρο με στατιστικές και γεωστατιστικές μεθόδους. Τεχνικά Χρονικά 20: 31-40.

Τσατσαρέλης, Α.Κ., 2006. Διαχείριση Γεωργικών Μηχανημάτων. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, pp. 477-514.

Υπουργική Απόφαση 125347/568/2004 ΦΕΚ 142/Β/29.1.2004. Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής. pp. 2-14.

Φασούλας, Κ.Α. 1991. Στοιχεία πειραματικής στατιστικής. Εκδόσεις: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη. pp. 95-123.

Φωτιάδης, Α.Ν. 1996. Εισαγωγή στη στατιστική για βιολογικές επιστήμες. 2η Έκδοση. Εκδόσεις University Studio Press. Θεσσαλονίκη. pp. 135-160.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Acaroğlu, M. and Şemi Aksoy. 2005. The cultivation and energy balance of Miscanthus×giganteus production in Turkey. Biomass and Bioenergy, 29: 42-48.

Alam, M., Trooien, T., Stone, S. and Rogers, R. 2000. Subsurface drip irrigation for Alfalfa. In Proc. 4th National Irrigation Symposium. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 373-378.

Alexopoulou, E., Chatziathanassiou, A., Panoutsou, C., Koutoukidis, A., Tsakiris, S., Drimaki, E. 2000. Yields and public perception of sweet sorghum grown in demonstrative fields of Northern Greece. In: James, James, editors. Proceedings of the First World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, June 5–9.. pp. 1638–41.

Alizadeh, A. 2001. Principles and Practices of Trickle Irrigation. Ferdowsi University, Mashad,Iran.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Allen, G.R., Pereira, S.L., Dirk, R. and Martin, S. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO Irrigation And Drainage. Paper No 56, FAO Rome. pp. 1-194.

Al-Nakshabandi, G.A., Saqqar, M.M., Shatanawi, M.R., Fayyad ,M. and Al-Horan, I.H. 1997. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. Agricultural Water Management, 34: 81-94.

Al-Omran, M. A., Sheta. S. A., Falatah, M. A. and Al – Harbi, R. A. 2004 . Effect of drip irrigation on squash (Cucurbita pepo) yield and water – use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. Agricultural Water Management, 73(1): 43-55.

Anderson, B., and P. Guyer. 1986. Summer annual forage grasses. NebGuide G74-171A. Nebraska Cooperative Extension. Univ. of Nebraska, Lincoln, NE.

ASAE STANDARDS. 2005. EP405.1 FEB03. Design and Installation of Microirrigation Systems. ASAE, St. Joseph, Mich.

Ayars, J.E., Phene, J.C., Schneman, A.R., Meso, B., dale, F. and Penland, J. 1995. Impact of bed location on the operation of susurface drip irrigation systems. In Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources / Preserving the Environment, Proc. 5th International Microirrigation Congress, ed. F.R. Lamm, 2-6-April, Orlando, Florida, ASAE , pp. 141-146.

Ayars,.J.E., Phene, J.C., Hutmacher, B.R., Davis, R.K., Schoneman, A.R., Vail, S.S and Mead, M.R. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. Agricultural Water Management 42: 1-27.

Ayars, E. J., Shoneman, A.R., Dale, F., Meso, B. and Shouse. P. 2001. Managimg subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water. Agricultural Water Management. 47 (3): 243-264.

Bar-Yosef B. 1999. Advances in fertigation. Adv. Agron 65:2–77

Batchelor, C.H. and Soopramanien, C.G. 1995. Water use and irrigationcontrol drip-irrigated sugar cane. In Proc. 5th Inteernational Microirrigation Congress, ed F.R. Lamm. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp.717-722.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Bell, A.A., Liu, L., Reidy, B., Davis, M.R. Subbarao, V.K. 1998. Mechanismus of Subsurface Drip Irrigation – Mediated Suppression of Lettuce Drop Caused by Sclerotinia minor. Phytopathology, 88(3): 252-259.

Ben-Asher, J. and Phene, J.C. 1993. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In Subsurface Drip Irrigation – Theory, Peactices and Application. CATI Pub. No. 92 1001. Fresno, Calif.: California State University. pp. 185-202.

Benjamin, J. M. 1992. Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Las Vegas, Nevada, 89193. pp. 3-7, 6-11, 6-12.

Berenguer, M.J. and Faci, J.M. 2001. Sorghum yield compensation processes under different plant densities and variable water supply. European Journal of Agronomy 15(1): 43–55

Bhattarai, S., McHugh, J., Lotz, G. and Midmore, D. 2003. Physiological responses of cotton to subsurface drip irrigation on heavy clay soil. pp. 1-3. http://www.regional.org.au.

Biomass Energy Centre, 2007. www.biomassenergycentre.org.uk

Bird, G.W., Edens, T., Drummond, F and Groden, E. 1990. Design of pest management systems for sustainable agriculture. In: C.A. Fransis, C.B. Flora and L.D King (Editors), Sustainable Agriculture in Temperate Zones. Wiley, New York, pp. 55-143.

Bolsen, K.K. 2004. Sorghum silage: A summary of 25 years of research at Kansas State University. Southeast Dairy Herd Management Conference, Macon, GA. Nov. 16-17. pp. 1-9

Bonari, E., Mazzoncini, M., Petrini, C., Bazzocchi, R. and Masoni, A. 1996. Effect of irrigation and nitrogen supply on biomass production from sorghum in northern central Italy. Agr. Med. 126, 217-226.

Bordovsky, J.P. and Lyle, M.W. 1996. LEPA irrigation of grain sorghum with varying water supplies. Trans. ASAE 39 (6): 2033-2038.

Bordovsky, J.P., and Porter, D. 2003. Cotton response to pre-plant irrigation level and irrigation capacity using spray, LEPA, and subsurface drip irrigation. Presented at the 2003 ASAE International Meeting, Las Vegas, NV, 27-30

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

July. ASAE Paper No. 032008. http://asae.frymulti.com/abstract.asp?aid=13753&t=2

Bos, M.G. 1979. Standards for irrigation efficiencies of ICID. J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 105 (IRI), 37–43.

Bos, G.M., Kselik, L.A.R., Allen, G.R. and Molden, J.D. 2009. Water Requirements for Irrigation and the Environment. Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8947-3. pp. 13-142.

Bozkurt, Y., Yazar, A., Cençel, B. and Sezen, S.M. 2006. Optimum lateral spacing for drip-irrigeted corn in the Mediterranean Region of Turkey. Agricultural Water Management, 85: 113-120.

Bracy, R.P., Edling, L.R. and Moser, B.E. 1995. Drip-irrigation managementand fertilization of bell pepper in a humid area. In Proc. 5th International Microirrigation Congress, ed. F.R.Lamm. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 181-186.

Bréda, J.J.N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany, vol. 54, No. 392. pp. 2403-2417.

Bristow, K.L., Cote, M.C., Thorburn, J.P. and Cook.J.F. 2000. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation. In Proc.6th International Micro-Irrigation Congress, October 22-27, South Africa. http://www.derm.qld.gov.au/rwue/rwue_catalogue/display_catalogue.php?id=68776

Brooks, H.L. 1998. Major Sorghum Insects. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 21-23. www.oznet.ksu.edu

Brouwer, C. and Heibloem, M. 1986. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Training Manual No. 3. Publications Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome. pp. 1-60.

Buchleiter, G. H. (1992). Performance of LEPA equipment on center pivot machines. Appl. Engrg. in Agric., 8(5), 631–637.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Bucks, D.A., Erie, J.L., French, F.O., Nakayama, S.F. and Pew, W.D. 1981. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. ASAE Trans. 24(6) : 1482-1489.

Bucks, D.A., Nakayama, F.S. 1982. Principles, practices, and potentialities of trickle (drip) irrigation. Adv Irrig I: 220–290.

Burke, J.J., Mahan, J.R. and Hatfield, J.L. 1988. Crop-specific thermal kinetic windows in relation to wheat and cotton biomass production. Agronomy Journal, 80(4): 553-556.

Burke, J.J., Hatfield, J.L. and Wanjura, D.F. 1990. A thermal stress index for cotton. Agronomy Journal, 82 (3): 526–530.

Busch, C.D. and Kneebone, R.W. 1966. Subsurface irrigation with perforated plastic pipe. ASAE Trans. 9(1) : 100-101.

Caldwell, D.S., Spurgeon, E.W. and Manges, L.H. 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip-irrigatedcorn. ASAE Trans. 37(4): 1099-1103.

Camargo, M.B.P. and Hubbard, K.G. 1999. Drought sensitivity indices for sorghum crop. J. Prod. Agric. 12, 312–316

Camp, C.R., Sadler, J.E. and Busscher, J.W. 1989. Subsurface and alternate-middle micro irrigation for the southeastern coastal plain. ASAE Trans. 32(2): 451-456.

Camp, C.R., Garrett, T.J., Sadler, J.E. and Busscher, J.W. 1993. Microirrgation management for double-cropped vegetables in a humid area. Transactions of the ASAE, 36: 1639-1644.

Camp, C.R., Sadler, J.E. and Busscher, J.W. 1997. A comparison of uniformity measure for drip irrigation systems. Transactions of the ASAE, 40: 1013-1020.

Camp, C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. ASAE Trans. 41(5): 1353-1367.

Camp, R.C.Jr and Lamm, L.F. 2008. Irrigation Systems : Subsurface Drip. In Trimble, W.S., "Encyclopedia of Water Science". 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 633-637.

Campbell, G.S. and Norman, J.M. 1998. An introduction to Environmental Biophysics. 2nd Edition. Springer, New York. pp. 223-246.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Capra, A. and Scicolone, B. 1998. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. Journal of Agricultural Engineering Research, 70: 355-365.

Capra A, Scicolone B. 2004. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. Agricultural Water Management, 68:135-149.

Capra A, Scicolone B. 2005. Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater. Irrigation and Drainage, 54: S71-79.

Capra, A. and Scicolone, B. 2007. Rycicling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. Journal of Cleaner Production 15: 1529-1534.

Çetin, B., Yazganand, S. and Tipi, T. 2004. Economics of drip irrigation of olives in Turkey. Agricultural Water Management, 66(2): 145-151.

Chatziathanassiou, A., Christou, M., Alexopoulou, E., Zafiris, C. 1998. Biomass and sugar yields of sweet sorghum in Greece. In: Chartier, et al. (Eds.), Proceedings of the 10th European Conference. C.A.R.M.E.N. Press, Germany, pp. 209–212.

Chase, R.G. 1985a. Phosphorus application through a subsurfacetrickle system. In Drip/TrickleIrrigationin Action, Proc. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress, November 18-21, Fresno, California, St. Joseph, Mich.: ASAE, 1: 393-400.

Chase, R.G. 1985b. Subsurface trickle irrigation in a continues cropping system. In Drip/Trickle irrigationin Action, Proc. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress. St. Joseph, Mich.: ASAE, 2: 909-914.

Clark, A.G. 2008. Irrigation Design: Steps and Elements. In S.W. Trimble "Encyclopedia of Water Science. 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 559-563.

Clyma, W. 2008. Irrigation systems: History. In: Stanley W. Trimble "Encyclopedia of Water Science". Second Edition. CRC Press Taylor Francis Group. pp. 628-631. http://www.taylorandfrancis.com

Cohen, S., Ianetz, A. and Stanhill, G. 2002. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. Agric. For. Meteorol. 111: 83-91.

Colaizzi, P.D., Schneider, A.D., Evett, S.R. and Howell, T.A. 2004. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. American Society of Agricultural Engineers, vol. 47(5): 1477−1492.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Colaizzi, P.D., Lamm, R.F., Howell, T.A, and Evett, S.R. 2006. Crop production comparison under various irrigation systems. In: Proc. Central Plains Irrigation Conference, Colby, KS., Feb. 21-22. Available from CPIA, 760 N. Thomson, Colby, KS. pp. 189-207.

Cook, R.D. 1977. Detection of Influential Observations in Linear Regression. Technometrics, 19 (1): 15–18.

Cook, R.D. 1979. Influential Observations in Linear Regression. Journal of the American Statistical Association, 74 (365): 169–174.

Cosentino, S.L. 1996. Crop physiology of sweet sorghum. Proc. Of First European Seminar on Sorghum for energy and industry. Toulouse, 1-3 April. pp. 30-41.

Curt, M.D., Fernandez, J. and Martinez, M., 1995. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) cv. ''Keller'' in relation to water regime. Biomass Bioenergy 8 (6), 401–409.

Dalianis, C., 1996. Adaptation, productivity and agronomic aspects of sweet sorghum under EU conditions. In: Proceedings of the First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, held in France, 1–3 April, pp. 15–25.

Davis, S. and Nelson, D.S. 1970. Subsurface irrigation today and tomorrow in Callifornia. In Proc. National Irrigation. Symposium St. Joseph, Mich.: ASAE, pp. H1-H8.

Davis, S. and Pugh, J.W. 1974. Drip irrigation: Surface and susurface compared with sprinkler and furrow. In Proc. 2nd International Drip Irrigation Congress. Riverside, Calif.: University of California, pp. 109-114.

Davis, S. 1975. Drip irrigation. In Pair CH, Hinz WH, Reid C, Frost KR (eds) Sprinkler irrigation. Irrigation Association, Silver Spring, Md., pp 508–528

Darusman, A., Khan, H., Stone, R.L. and Lamm, R.F. 1997. Water flux below the root zone vs. drip line spacing in drip-irrigated corn. Soil Science Society American Journal, 61: 1755-1760.

Delta-T Devices Ltd. 2007. Flood and Drain Irrigation Control with a GP1 Logger version 1.0. pp. 2-22. http://www.delta-.co.uk

Dercas, N. and Liakatas, A. 1999. Sorghum Water Loss in Relation to Irrigation Treatment. Water Resources Management 13: 39-57.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Dercas, N. and Liakatas, A. 2006. Water and Radiation Effect on Sorghum Productivity. Water Resources Management, DOI 10.1007/s11269-006-9115-2. pp. 1-15.

Dolciotti, I., Mambelli, S., Grandi, S. and Venturi, G. 1998. Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production. Industrial Crops and Products, 7: 265-272.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation Drainage. Paper No. 24. Rome. pp. 10-144.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1977. Guideline for predicting crop water requirements. FAO Irrigation Drainage. Paper No. 24. FAO, Rome. pp. 10-140

Dreier T, Geiger B, Wagner U. 1998. Environmental impacts and system analysis of biofuels. In: Kopetz, Weber, Palz, Chartier, Ferrero, editors. Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition: Biomass for Energy and Industry, WTurzburg, Germany, June 8–11. pp. 544–548.

Edwards, D.M., Eastin, D.J., Olson, A.R. and German, R. 1970. Susurface irrigation today and tomorrow in the Midwst. In Proc. Nat. Irrig. Symp. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. G1-G11.

El Bassam N, Graef M, Jakob, K. 1998. Sustainable energy supply for communities from biomass. In: El Bassam N, Behl R.K, Prochnow B, editors. Proceedings of the International Conference on Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry, Braunschweig, Germany, June 22–28, vol. 2, pp. 837–843.

El Bassam, N., 1998. Fundamentals of sustainability in agriculture production systems and global food security. In: El Bassam, N., Behl, R.K., Prochnow, B. (Eds), Proc. of the Int. Conference Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry, 1, pp. 3–11.

Elliades, G. 1988. Irrigation of greenhouse –grown cucumber. J Horticultural Science 63(2): 235s-239s

Enciso, J.M., Colaizzi, D.P. and Multer L.W. 2005. Economic analysis of subsurface drip irrigation lateral spacing and installation depth for cotton. Trans. ASAE 48(1): 197-204.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Ertek, A., Şensoy, S., Gedik, İ. and Küçükyumuk, C. 2006. Irrigation scheduling based on evaporation values for cucumber (*Cucumis sativusL.*) grown under field conditions. Agricultural Water Management 81: 159-172.

Eurostat. 2009. http://epp.eurostat.ec.europa.eu

Farré, I. and Faci, M.J. 2006. Compairative response of maize (Zea mays L.) and sorghum (Sorghum Bicolor L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. Agricultural Water Management, 83: 135-143.

Faci, M.J. and Fereres, E. 1980. Responses of Grain Sorghum to Variable Water Supply under Two Irrigation Frequencies. Irrigation Science 1: 149-159.

FAO Production. 2002. Sweet Sorghum in China. Available at: www.fao.org.

FAO.2003. Available at: www.fao.org.

Fipps, G., and New, L. L. 1990. Six years of LEPA in Texas—less water, higher yields. Proc., 3rd Nat. Irrig. Symp., American Society of Agricultural Engineers, Phoenix, 115–120.

Fisher, A.R. 1924. On a distribution yielding the error functions of several well known statistics. In Proceedings of the International Congress of Mathematics. Toronto, 2:805-813.

Foti, S., Cosentino, S.L., Copani, V., Patanè, C. and Guarnaccia, P., 1996. Growth and yield of C_4 species for biomass production in Mediterranean environment. Proc. 9th European Bioenergy Conference Biomass for energy and environment. pp. 616-621.

Franzluebbers, J.A., and Francis, A.C. 1995. Energy output:input ratio of maize and sorghum management systems in eastern Nebraska. Agriculture, Ecosystems and Environment, 53: 271-278.

Francois, L.E., Donovan, T. and Maas, E.V. 1984. Salinity effects on seed yield, growth and germinationof grain sorghum. Agronomy Journal, 76: 741-744.

Fribourg, H.A. 1995. Summer annual grasses. In R.F.Barneset al. (ed) Forages. Vol.1 5th ed. Iowa state University Press Ames. pp. 463-472.

Galton, F. 1886. Regression towards mediocrity in hereditway statuge. The Journal of Anthropological Institude of Great Britain and Ireland. Anthropological Miscellanews, 15: 246-263.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Gardner, C.M.K., Bell, J.P., Cooper, J.D., Dean, T.J., Gardner, N. and Hodnett, M.G. 1991. Soil water content. In: Soil analysis: physical methods, K.A. Smith, C.E. Mullins (Eds) Markel Dekker, Inc, New York, USA, pp. 1-73.

Garrity, D.P., Watts, D.G., Sullivan, C.Y. and Gilley, J.R. 1982. Moisture deficits and grain sorghum performance: Effect of genotype and limited irrigation strategy. Agronomy Journal, 74: 808-814.

Gibson, W. 1974. Hydraulics, mechanics and economics of subsurface and drip irrigation of Hawaiian sugarcane.. In Proc. 15th Congress International Society SugarCane Technol. Honolulu, Hawaii: Hawaiian Sugar Planters' Association 2: 639-648

Gilley, J.R. and Allred, R.E. 1974a. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals. ASAE Trans. 17(5): 927-933.

Gilley, J.R. and Allred, R.E. 1974b. 1974b. Optimum lateral spacing for subsurface irrigation systems. In Proc. 2nd International Drip Irrigation Congress. Riverside, California: University of California. pp. 234-239.

Girma, F.S. and Krieg, D.R., 1992. Osmotic adjustement in sorghum. I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. Plant Physiol. 99: 577–582.

Goldberg, D. and Shmueli, M. 1970. Drip irrigation – A method used under arid desert conditions of high water and soil salinity. ASAE Trans. 13(1): 38-41.

Gollehon, N. 2008. Irrigation Economics: United States. In S.W. Trimble "Encyclopedia of Water Science. 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 572-575.

Goodwin, I. and Tatura. 2000. Construction of an evaporation pan for irrigation Scheduling. Agriculture Notes. State of Victoria, Department of Primary Industries. pp. 1-4.

Gosse, G. 1996. Overview on the different filières for industrial utilisation for sorghum. Proc. First seminar on sorghum for energy and industry. Toulose, 1-3 April. pp. 10-15.

Gundekar, G.H., Khodke, M.U., Sarkar, S. and Rai, K.R. 2008. Evaluation of ran coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science 26: 169-175.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Hall, D. O., F. Rosillo-Calle, R. H. Williams, and J. Wood, 1993: Biomass for energy supply prospects. In: Renewable Energy: Sources for Fuel and Electricity, eds Johansson et al., Island Press, Washington, DC, p.p. 593-652.

Hanks, R.J. 1983. Yield and water-use relationships: an overview. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI, USA, pp. 393–411.

Hanson, E.G., Williams, B.C., Frangmeier, D.D. and Wilke, O.C. 1970. Influence of subsurfce irrigation on crop yields and water use. In: Proc. National Irrigation Symposium, St. Joseph, Mich.: ASAE, pp. D1-D13..

Hanson, E.G., and Patterson, C.T. 1974. Vegetable production and water-use efficiency as influenced by drip, sprinker, subsurface and furrow irrigation methods. In Proc. 2nd International Drip Irrigation Congress, Riverside, Calif.: University of California, pp. 97-102.

Hanson, R.G., Stecker, J.A., and Maledy, S.R. 1988. Effect of soyabean rotation on the response of sorghum to fertilizer nitrogen. J. Prod. Agric., 1: 318-321.

Hanson, B. and May, D. 2004. Effect of subsurface drip irrigation on process tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. Agricultural Water Management. 68 (1), pp. 1-17.

Heichel, G.H. and Bames, D.K. 1984. Opportunities of meeting crop nitrogen needs from symptom nitrogen fixation. In: D.F. Bezdicek, J.F. Power, D.R. Keeney,and M.J. Wright (Editors, Organic Farming: Current Technology and its Role in a Sustainable Agriculture. ASA Spec. Publ. No.46. Am Soc. Agron. Madison, W1, pp. 49-59.

Henggeler, J.C. 1995. A history of drip-irrigatedcotton in Texas. In Proc. 5th International Microirrigation Congress ed. F.R. Lamm. St. Joseph, Mich.: ASAE,. pp. 669-674.

Hiler, E.A. and Howell, T.A. 1983. Irrigation options to avoid critical stress: an overview. In: Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR (eds) Limitations to efficient water use in crop production. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 479-497

Hopkins, J.W. 1939. Estimation of leaf area in wheat from linear crops, especially corn where the cable and beamfraction dimensions. Can. J. Res. 17:300–304.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Howell, T.A., Cuenca, R.H. and Solomon, K.H. 1990. Crop yield response. In: Hoffman (ED), Management of Farm Irrigation Systems. ASAE. pp. 312s.

Howell, T.A., Schneider, D.A. and Stewart, A.B. 1995. Subsurface and surface microirrigation of corn-US SouthernHigh Plains. In Proc. 5th International Microirrigation Congress, ed. F.R.Lamm. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 375-381.

Howell, T.A., Schneider, D.A and Evett, R.S. 1997. Subsurface and surface microirrigation of corn-Southern High Plains. ASAE Trans.40(3): 635-641.

Howell, T.A., Tolk, J.A., Schneider, A.D. and Evett, S.R. 1998. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of corn hybrids different in maturity. Agronomy Journal, 90: 3-9.

Howell, T. 2000. Drops of life in the history of irrigation. Irrigation Journal., 50 (1), 8–15.

Howell, A.T. 2008. Irrigation: Efficiency. In S.W. Trimble "Encyclopedia of Water Science". 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 640-645.

Hunsaker, D.J., Clemmens, J.A. and Fagmier, D.D. 1998. Cotton response to high frequency surface irrigation. Agricultural Water Management, 37: 55-74.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol., 24: 45–55.

Idso, S.G. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agric. Meteorol., 27: 59–70.

Itier, B., Flura, D., Belabbes, K., Kosuth, P., Rana, G. and Figuerido, L. 1997. Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soyabean grown in several locations. Irrigation Science 13: 109-114.

Ivarsson, E and Nilsson, C. 1988. Smelting Temperature of Straw Ashes and Without Additives. S.I.L.B.S.L. 153. pp.84.

Jackson, R.D., Idso, D.B., Reginato, R.J. and Pinter, P.J., Jr. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res., 17, 1133–1138.

James, L.G. 1988. Principles of Farm Irrigation System Design. John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 51-110.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Jardine, D. 1998. Major Sorghum Diseases. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 18-21. www.oznet.ksu.edu

Jnad, I., Lesikar, B., Sabbagh, G. and Kenimer, A. 2000. Characterizing soil hydraulic properties in a subsurface drip drain field. In Proc. 4th National Irrigation Symposium. November 14-16, Phoenix, Arizona. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 670-676.

Jnad, I., Lesikar, B., Kenimer, A. and Sabbagh, G. 2001. Susurface drip dispersal of residential effluent:II. Soil hydraulic characteristics. ASAE Trans. 44(5): 1159-1165.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weis, M. and Baret, F. 2004. Reviewofmethodsfor in situ leaf area indexdetermination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology, 121(1–2), 19–35.

Jones, O.R. and Clark N.R. 1987. Effects of furrow dikes on water conservation and dryland crop yield. Soil Science Society Of American Journal, 51(5): 1307-1314.

Jorgensen, G.S. and Norum, N.K. ed. 1993. Subsurface Drip irrigation-Theory, Practices and Application. CATI Pub. No. 921001. Fresno, CA: California State University. pp. 212.

Kalfountzos, D., Sakellariou-Makrntonaki, M. and Tzimopoulos, C. 2002. Study of soil water movement using time domain reflectometr. In Proc. 17th World Congress of Soil Science. August 14-21, Bangkok, Thailand, Symposium, No. 4 pp. (42) 1-9.

Kalfountzos, D., Sakellariou-Makrntonaki, M., Tzimopoulos, C. and Yannopoulos. 2003. Laboratory Experiments on Water Movement in a Layered Soil Sample Using TDR Method. In Proc. XXX Congress of IAHR (International Association of Hydraulic Engineering and Research), August 24-29, Thessaloniki, Theme B, pp. 763-770.

Keller, J. and Karmeli, D. 1974. Trickle irrigation design parameters. ASAE Trans. 17: 678-684.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Khallilain, A., Sullivan, J.M. and Smith, B.M. 2000. Lateral depth placement and deep tillage effects in a subsurface drip irrigation system for cotton. In Proc. 4th National Irrigation Symposium,. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 641-646.

Kincaid, D. C., and Longley, T. S. 1989. A water droplet evaporation and temperature model. Trans. ASAE, 32(2), 457–463.

Kirk, K., Andersen, H.J., Thomsen, G.A., Jørgensen R.J. and Jørgensen, N.R. 2009. Estimation of leaf area index in cereal crops using red-green images. Biosystems Engineering XXX, 104(3): 308-317.

Kırnak, H., Doğan, E., Demir, S. and Yalçın, S. 2004. Determination of hydraulic performance of trickle irrigation emitters used in irrigation system in the Harran Plain. Turk. J. Agric. For. 28: 223-230.

Kneipp, J. 2006. Grain sorghum: NSW planting guide 2006-07. NSW Department of Primary Industries. Primefact 266. pp. 1-11. http://www.dpi.nsw.gov.au

Kohl, K. D., Kohl, R. A., and DeBoer, D. W. (1987). Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. Trans. ASAE, 30(4), 1071–1074.

Kranz, W.L., Eisenhauer, D.E. and Rotka M.T. 1992. Water and energy conservation using irrigation scheduling with center-pivot irrigation systems. Agric. Water Manage., 22: 325-334.

Krieg, D.R. and Lascano, R.J. 1990. Sorghum. In: Stewart, B.A.,Nielsen, D.R. (Eds.), Irrigation of Agricultural Crops. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 719–740

Kruse, E.G. and Israeli, I. 1987. Evaluation of a subsurface drip irrigation system. Presented at the 1987 Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. ASE Paper No. 87-2034. ASAE, St. Joseph, Mich, pp. 1-21.

Lal, K.N., and M.S. Subba Rao. 1950. A rapid method for estimation sensor stand can get tangled in and around leaves, ears, of leaf area in growing maize plants. Curr. Sci. 19:179–180.

Lamm, F.R., Manges, L.H. 1991. Nitrogen fertilization for drip irrigated corn in northwest Kansas. Presented at the international winter meeting of the ASAE, Chicago, December 17–20. ASAE, Paper No. 912596. St Joseph, Mich., USA, pp. 14-20.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Lamm FR, Manges, L.H., Stone, R.L., Khan, H.A. and Rogers, H.D.1995a. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas. Trans. ASAE 38(2): 441–448.

Lamm, F.R., Spurgeon, W.E., Rogers, D.H. and Manges, L.H. 1995b. Corn production using subsurface drip irrigation. In Proc. Of the 5th International Mocroirrigation Congress. Orlando, Florida, Aplil 2-6. ASAE, St. Joseph, Mich, USA, pp. 388-394

Lamm, R.F., Clark, A.G., Yitayew, M., Schoneman, A.R., Mead, M.R. and Schneider, D.A. 1997a. Installation Issues for SDI Systems. Presented at the Irrigation Association's 16th Annual International Irrigation Exposition and Technical Conference. Phenix, Arizona. November 12 - 14, 1995. ASAE Paper No. 972074. pp. 1-6.

Lamm, R.F., Stone, R.L, Manges, L.H. and O'Brien, M.D. 1997b. Optimum lateral spacing for subsurface drip-irrigated corn. Trans ASAE 40(4): 1021-1027.

Lamm, R.F., Trooien, T., Clark, G., Rogers, D. and Alam, M. 1997c. SDI and Electrotechnologies. Presented at the EPRI–Agricultural Technology Alliance semi-annual meeting. May 28-30, Boise, Idaho. pp. 1-5 http://www.ksre.ksu.edu/sdi/Reports/1997/SDI&Electrotechs.htm

Lamm, R.F. and Trooien, P.T. 2003. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. Irrigation Science 22: 195-200.

Lampkin N. 1990. Organic farming, Farming Press, U.K

Lansford, D.V. and Segarra, E. 2004. The dollars and cents of subsurface drip irrigation (SDI) for cotton in the southern High Plains of Texas. In Proc. of Beltwide Cotton Conference. San Antonio, Texas, January 5-9. pp. 575-580.

Liebman, M. and Janke, R.R. 1990. Sustainable weed management practices. In: C.A. Fransis, C.B. Flora and L.D. King (Editors). Sustainable Agriculture in Temperate Zones. Wiley, New York, pp. 111-143.

Ludlow, M.M., Santamaria, J.M. and Fukai, S. 1990. Contribution of osmotic adjustment to grain yield in Sorghum bicolor (L.) Moench under water-limited conditions. II. Water stress after anthesis. Aust. J. Agric. Res. 41: 67–78.

Lyle, W. M., and Bordovsky, J. P. 1981. Low energy precision application (LEPA) irrigation system. Trans. ASAE, 24(5), 1241–1245.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Lyle, W. M., and Bordovsky, J. P. 1983. LEPA irrigation system evaluation. Trans. ASAE, 26(3), 776–781.

Maas, E.V., Hoffman, G.J., Chaba, G.D., Poss, J.A. and Shannon, M.C. 1983. Salt sensitivity of corn at various growth stages. Irrigation Science, pp. 4: 45.

Maas, V.E., Poss, A.J. and Hoffman, J. G. 1986. Salinity Sensitivity of Sorghum at Three Growth Stages. Irrigation Science, 7: 1-11.

Maas, S. 2008. Irrigation Scheduling: Remote Sensing Technologies. In S.W. Trimble "Encyclopedia of Water Science". 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 606-610.

Maisiri, N., Senzanje, A., Rockstrom, J. and Twomlow, J.S. 2005. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. Physics and Chemistry of the Earth, 30: 783-791.

Manges, H.L., Spurgeon, E.W., Huang, M.Z. and Tomsicek, J.D. 1995. Subsurface drip line spacing and plant population for corn production. In Proc. Of the 5th International Microirrigation Congress,.Orlando Florida, April 2-6,. ASAE, St. Joseph, Mich., USA, pp. 388-394.

Marsalis, A.M. 2006. Sorghum Forage Production in New Mexico. Guide A-332. N.M State University. pp. 1-6. http://www.cahe.nmsu.edu

Martin, J.H., W.H. Leonard, and D.L. Stamp. 1976. Principles of field crop production. Macmillan Publishing Co., Inc. New York, pp. 82.

Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G., Steduto, P., 1995. Sweet sorghum in Mediterranean climate: radiation use and biomass water use efficiencies. Ind. Crops Prod. 3, 253–260.

Mastrorilli, M., Katerji, N. and Rana, G. 1999. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages. Eur J Agron 11(3–4): 207–215

Mikkelsen, R.L. 1989. Phosphorus fertilization through drip irrigation. J. Proc. Agric. 2(3): 279-286.

Miller, D.E. and Aarstad, J.S. 1976. Yields and sugar content of sugarbeets as affected by deficit high-frequency irrigation. Agronomy Journal, 68: 231–234.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Miller, F.R. and Creelman, R.A., 1980. Sorghum. A new fuel. In: Proc. 35th Annual Corn Sorghum Res. Conference. Am. Seed 'Bade Assoc., Washington, DC. pp. 219-232.

Mitchell, W.H. 1981. Subsurface irrigation and fertilization of field corn. Agronomy Journal 73(6): 913-916.

Monteith, J.L. 1993. The exchange of water and carbon by crops in a Mediterranean climate. Irrigation Science 14, 85–91.

Monti, A. and Venturi, G. 2003. Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. European Journal of Agronomy 19: 35-43.

Montgomery, C.D. and Runger, C.G. 1999. Applied Statistics and Probability for Engineers. 2nd Edition. John Wiley & Sons. pp.430-529.

Montgomery, C.D. and Runger, C.G. 2003. Applied Statistics and Probability for Engineers. 3nd Edition. John Wiley & Sons. pp. 372-459.

Moore A. 1997. Environmentally sound production of liquid biofuels: the view of the European commission. In: Worgetter M, Jorgensen U, editors. Proceedings of the International Workshop on Environmental Aspects of Energy Crop Production, Brasimone, Italy, October 9–10. pp. 43–66.

Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. and Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface–air temperature and spectral vegetation index. Remote Sens. Environ., 49: 246–263.

Mortvedt, J.J., Westfall, D.G., & Croissant, R.L. (1996). Fertilizing grain and forage sorghums (Crop Series no. 0.540). Fort Collins, CO: Colorado State University Cooperative Extension. Retrieved July 5, 2007, from http://www.wcainfonet.org/servlet/BinaryDownloaderServlet?filename=1068717516765_cl23.pdf pp. 1-6.

Muchow, R.C. 1989. Comparative productivity of maize sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. II Effect of water deficits. Field Crops Res., 20: 207-219.

Musick, J. T., F. B. Pringle, and J. D. Walker. 1988. Sprinkler and furrow irrigation trends − Texas High Plains. Appl. Eng. inAgric. 4(1): 46−52.

Musick, J. T., F. B. Pringle, W. L. Harman, and B. A. Stewart. 1990. Long−term irrigation trends − Texas High Plains. Appl. Eng. In Agric. 6(6): 717−724.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Muschalek I, Scharmer K. 1992. The global ecological balance for engine fuel production from vegetable oils. In: Hall DO, Grassi G, Scheer H, editors. Proceedings of the Seventh E.C. Conference: Biomass for Energy and Industry. pp. 578–583.

Nagy, N.N., 1999. Energy Coefficients for Agriculture Inputs in Western Canada. www.csale.usask.ca/PDFDocuments/energyCoefficientsAg

Nakayama, F.S. and Bucks, D.A. 1990. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. Irrigation Science, 12(4): 187-192.

Neibling, W.H. and Gallian, J.J. 1997. Irrigation Water Management in Sugarbeet Production. Presented at Sugarbeet Schools on Junuary 27-31. http://www.uidaho.edu/sugarbeet/irrg/irrgbeet.htm

New, L. 2004. Grain Sorghum Irrigation. The Texas A&M University System. Productive Rotation on Farm in Texas. Texas Cooperative Extension. pp. 1-7. http://texasextension.tamu.edu

Novalynx Corporation. 2007. Model 255-200 Evaporation Pan. Instruction Manual. pp. 1-4. http://www.novalynx.com/manuals

O'Brien, D.M., Rogers, H.D., Lamm, R.F. and Clark, A.G. 1998. An economic comparison of subsurface drip and center pivot irrigation systems. Appl. Eng. Agric. 14(4): 391-398

Odum, H.T., 1984. In: Stanhill, G. (Ed.), Energy Analysis of the Environmental Role in Agriculture. Springer, Berlin. pp. 24-51.

Okken PA, Bos S, Van Doorn J, Kram T, Lako P, Ybema JR. 1992. The role of energy crops in the energy system under CO2 constraints. In: Hall DO, Grassi G, Scheer H, editors. Proceedings of the Seventh E.C. Conference: Biomass for Energy and Industry. pp. 562–568.

Oron, G., DeMalach, Y., hoffman, Z and Cibotaru, R. 1991. Subsurface microirrigation with effluent. Journal Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 117(1): 25-36.

Ortega, J.F., Tarjuelo, M.J. and de Juan, A.J. 2002. Evaluation of irrigation performance in localized irrigation system of semiarid regions (Castilla-La Mancha, Spain): Agricultural Enginnering International: CIGR Journal of Scientific Research and development, 4: 1-17.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Papayannopoulou, A., Parissopoulos, G., Panoras, A., Kampeli, S., Papadopoulos, F., Papadopoulos, A., et al. 1998. Emitter performance in conditions of treated municipal wastewater. Proceedings of the 2nd International Conference AWT '98 Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Milan, pp. 1011-1014.

Pasternak, D., DeMalach, Y. and Borovic, I. 1986. Irrigation with brackish water under desert conditions. VII. Effect of time of application of brackish water on production of tomatoes (*Lycopersicum esculentum Mill.*) . Agricultural Water Management, 12: 149-158.

Pearce, R.B., Brown, H.R. and Blaser, E.R. 1965. Relationships between leagf area index, light interception and net photosynthesis in orchardgrass. Crop Science, 5: 553-556.

Petrini, C., Belletti, A. and Salamini, F., 1993. Accumulation and distribution of dry matter and soluble carbohydrates in two sweet sorghum cultivars: influence of sowing date and harvesting time. Eur. J. Agron., 2: 185-192.

Phene, C.J. 1974. High-frequency porous tube irrigation for water-nitrogen management in humid regions. In Proc. 2nd International Drip Irrigation Congress Riverside, Calif.: University of California, pp. 166-171.

Phene, C.J. and Beale, W.O. 1976. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. SoilSci. Soc. Am. J. 40(3): 430-436.

Phene, C.J. and Sanders, C.D. 1976. High-frequensy trickle irrigation and row spasing effects on yield and quality of potatoes. Agronomy Journal 68(4): 602-607.

Phene, C.J. and Beale, W.O. 1979. Influence of twin-row spasing and nitrogen rates on high-frequency trickle-irrigated sweet corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 43(6): 1216-1221.

Phene, C.J., M.F. Blume, M.M.S. Hile, D.W. Meek and Re, V.J. 1983. Management of subsurface trickle irrigation systems. ASAE Paper No. 83-2598, ASAE, St. Joseph, Mich.

Phene, C.J., Davis, R.K., Hutmacher, B.R. and McCormick, L.R.1987. Advantages of surface irrigation for processing tomatoes. Acta Horticulturae 200: 101-114.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Phene, C.J., Davis, K.R., McCormick, R.L., Hutmacher, R.B and Pierro, J. 1988. Water-fertility management for subsurface drip irrigated tomatoes. In: Proc. International Symposium Integrated Management Practices for Tomato and Pepper in the Tropics. Shanhua, Taiwan. pp. 325-338.

Phene, C.J., Hutmacher, B.R., Davis, R.K. and McCormick, L.R. 1990. Water-fertilizer management of processing tomatoes. Acta Horticalturae 277: 137-143.

Phene, J.C., Davis, R.K., Hutmacher, B.R., Bar-Yosef, B., Meek, W.D. and Misaki, J. 1991. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. Irrigation Science, 12: 135-140.

Phene, C,J. 1995. Research trends in microirrigation. In Proc. 5th International Microirigation Congress, ed. F.R.Lamm. St. Joseph, Mich.: ASAE. pp. 6-24.

Philip, J.R. 1968. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. Water Resour. Res. 4(5): 1039-1047.

Pimentel, D., 2003. Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative. Natural Resources Research, 12(2): 127-134.

Plaut, Z., Rom, M. and Meiri, A. 1985. Cotton response to subsurface trickle irrigation. In Proc. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress, St. Joseph, Mich.: ASAE. 2: 916-920.

Plaut, R., Garmi, A. and Grava, A. 1988. Cotton growth and production under drip irrigation restricted soil wetting. Irrigation Science, 9: 143-156

Potter, E., Wood, J. and Nicholl, C. 1996. Sunscan canopy analysis system: Users manual. Delta-T Devices. Cambridge, UK.

Powel, N.L. and Wright, S.F. 1993. Grain yield of subsurface microirrigated corn as affected by irrigation line spacing. Agronomy Journal, 85: 1164-1170.

Pruitt, W.O. 1966. Empirical method of estimating evapotranspiration using primarily evaporation pans. Proc. Conf. on Evapotranspiration and its Role in Water Resources Management. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Chicago, Dec. pp. 57-61.

Puig-Bargués, J., Arbat, G., Barraga´n, J. and Ramirez de Cartagena, F. 2005. Hydraulic performance of drip subunits using WWTP effluents. Agricultural Water Management, 77: 249-262.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Quaranta, F., Belocchi, A., Mazzon, V. and Fornara, M. 2000. Fibre sorghum: effect of the harvesting date on six hybrids with different cyrcle in Central Italy. www.ienica.net/italyseminar/posters/fibres/quaranta.pdf

Ravelo, C.J., Hiller, E.A. and Howell, T.A. 1977. Trickle and sprinkler irrigation of grain sorghum. Trans ASAE (Special Ed) 20 SW: 96-99.

Rawlins, S.L. and Raats, P.A. 1975. Prospects for high-frequency irrigation. Science 188: 604 – 610.

Regehr, D. 1998. Preharvest Desiccants for Sorghum. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 23-24. www.oznet.ksu.edu

Reynolds, D.M. and Elrick, E.D. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and a-parameter using Guelph Permeameter. Soil Science 140: 292-302.

Rhoades, J.D. 1984. New strategy for using saline waters for irrigation. Proc ASCE Irrigation and Drainage Spec Conf, Water-Today and Tomorrow, July 24-26, 1984, Flagstaff, Ariz. Pp. 231-236

Rogers, H.D. and Alam, M. 1998. Irrigation. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 15-18. www.oznet.ksu.edu

Roth, G.W., and J.K. Harper. 1995. Forage sorghum. Agronomy Facts 48. Penn State Cooperative Extension. Pennsylvania State Univ., University Park, PA.

Saeed, M.A.I. and El-Nadi, H.A. 1998. Forage sorghum yield and water use efficiency under variable irrigation. Irrigation Science, 18: 67-71.

Sakellariou-Makrantonaki, M. 1997. Water drainage in layerd soils. Laboratory experiments and numerical simulation. Water Res. Management, 11: 437-444.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D. and Vyrlas, P. 2001. Irrigation water saving and yield increase with susurface drip irrigation. Proc. Of the 7th International Congress of Environmental Science and Technology, 3-6 September, Syros Greece, vol. C, pp. 466-473.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P. and Kapetanos, B. 2002a. Water saving using modern irrigation methods. Proc. Of Hydrorama

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

2002, 3rd International Forum: Integrated Water Management: The key to Sustainable Water Resources, EYDAP, March 21-22, Athens, Greece, pp. 96-102.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D. and Vyrlas, P. 2002b. Water saving and yield increase of sugar beet with susurface drip irrigation. Global Nest: the International Journal, 4(2-3): 85-91.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Tentas I., Koliou A., Kalfountzos D. and Vyrlas P., 2003. Irrigation of ornamental shrubs with treated municipal wastewater. Proceedings of 8th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST), September 8-11, Lemnos, Greece, Vol. B, pp. 707-714.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Vyrlas P., Knekas E., Koliou A. and Vardouli V., 2004. Landscape irrigation with treated municipal wastewater. Accepted for Intl. Conf. of Protection and Restoration of the Environment VII, 28 June-1 July, Mykonos, Greece, (CD-ROM).

Sakellariou–Makrantonaki, M.,I. Vagenas, 2005a. Mapping crop evapotranspiration and total water requirements estimation in central Greece. European Water Journal, 13/14: 3-13

Sakellariou-Makrantonaki M., Tzavela E. and Vyrlas P., 2005b. Water conservation by irrigating with municipal liquid wastes. Proceeding of 9th International Conference on Environmental Science and Technology, September 8-11, Rhodes, Greece, pp. B803-808.

Sakellariou-Makrantonaki M., Tzavela E., Vyrlas P. and Tzimopoulos, C. 2005c. Water conservation by wastewater reuse through modern irrigation systems. Proceedings of 3rd IASME/WSEAS International Conference on Fluid Dynamics and Aerodynamics, August 20-22, Corfu, Greece.

Sakellariou - Makrantonaki M., Tzavela E., Vyrlas P. and Tzimopoulos, C. 2005d. Wastewaters reuse through subsurface drip irrigation. IASME Transactions, 6(2): 1071-1078.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D. and Danalatos, N. 2005e. The effects of irrigation methods on growth andyield of fier sorghum in Central Greece. In: Proceedings of the 6th International Conference of European Water Resourses Association (EWRA). Sector Decision Support Systems. Menton, France, No. 021

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Sakellariou-Makrantonaki, M., D. Papalexis, N. Nakos, S. Dasios, A. Chatzinikos, N. Papanikos, N. Danalatos, 2006a. Potential and water-limited growth and productivity of fiber Sorghum in central Greece irrigated by surface and subsurface drip methods n a rainy and a dry year. Proceedings of 6h International Conference of IASME/WSEAS on Energy and Environmental Systems, May 8-10, Chalkida, Greece, pp. 49-54.

Sakellariou-Makrantonaki, M., E. Papadakis, N. Papanikolaou, G. Zaggas, 2006b. Subsurface drip irrigation of sweet sorghum with municipal wastewater. Proceedings of the HAICTA International Conference, September 20-23, Volos, Greece, 433-438.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D., Nakos, N., Kalavrouziotis, I., K., 2007a. Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece. Agricultural Water Management 90. pp. 181-189.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Soulti, A., Papadakis, E. and Vyrlas, P. 2007b. Subsurface drip irrigation of sorghum with treated municipal wastewater. Proceedings of EWRA Symposium on Water Resources Management: New Approaches and Technologies, June 14-16, Chania, Greece, pp. 353-360.

Sakellariou-Makrantonaki, M., C. Papanikolaou, 2008a. Maximizing energy benefits by cultivating fiber sorghum in central Greece under intelligent irrigation methods. Proceedings of Protection and Restoration of the Environment IX, 29 June-3 July, Kefalonia, Greece, A5:5 (CD-ROM).

Sakellariou-Makrantonaki, M., C. Papanikolaou, 2008b. Biomass energy production by cultivating fiber sorghum in Greece under intelligent irrigation methods. Proceedings of 2nd WSEAS/IASME International Conference on Renewable energy sources, October 26-28, Corfu, Greece, pp. 29-34.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Papanikolaou, C., Mygdakos, E., Papanikos, N. 2009a. The effects of various irrigation systems on biomass production and economic results of sorghum crop. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 09) & SECOTOX Conference 21-26 June, Mykonos island, Greece, pp.1291-1296.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Sakellariou-Makrantonaki, M., Papanikolaou, C. and Mygdakos, E., 2009b. Fiber sorghum biomass yield, water use efficiency and economic results under different levels of water, using subsurface and surface irrigation systems. Fresenius Environmental Bulletin, volume 18-No 9, pp. 1624-1632

Sakellariou-Makrantonaki, and A.M., Giouvanis A.V., 2009c. Reuse of wastewater for water saving byirrigating energy plants. Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST 2009), 3-5 September, Chania, Crete, Greece, pp. A1224-1231.

Sammis, T.W. 1980. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface and furrow irrigation methods for row crops. Agronomy Journal 72(5): 701-704.

Segarra, E., Almas, L. and Bordovsky, P.J. 1999. Adoption of advanced irrigation technology: LEPA vs. drip in the Texas High Plains. In Proc. Beltwide Cotton Conf., Memphis, Tenn.: National Cotton Council, 1: 324-328..

Sentek Pty Ltd. 2006. EnviroSMART™ & EasyAG® SII. Voltage Probe Interface Manual. Version 1.01. pp. 1-9. www.sentek.com.au

Schneider, A. D., and Howell, T. A. 1990. Sprinkler efficiency measurement with large weighing lysimeters. Proc., 3rd Nat. Irrig. Symp., American Society of Agricultural Engineers, Phoenix, 69–76.

Schneider, A.D., and Howell, A.T. 1998. LEPA and spray irrigation of corn: Southern High Plains. Trans. ASAE 41(5): 1391-1396.

Schneider, A.D., and Howell, T.A. 1999. LEPA and spray irrigation for grain crops. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 125, No.4. pp. 167-172.

Schneider, A.D. and Howell, A.T. 2000. Surface runoff due to LEPA and spray irrigation of a slowly permeable soil. Trans. ASAE 43(5): 1089-1095.

Scischa, A., Ravina, I., Sagi, G., Paz, E., Yechiely, Z., Alkon, A., et al. 1996. Clogging control in drip irrigation systems using reclaimed wastewaterdThe Platform Trials. Proceedings of the 7th International Conference on Water and Irrigation. Tel Aviv, Israel, pp. 104-114.

Shock, C.C., Feibert, B.G.E. and Saunders, D.L. 1996. Automation of subsurface drip irrigation for Onion Production. Also available in. pp. 1-5. http://www.cropinfo.net/AnnualReports/1996/ondrip96.htm

Shoji, K. 1977. Drip irrigation. Science of America. 237(5): 62–68

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Shroyer, J., Kok, H. and Fjell, D. 1998. Seedbed Preparation and Planting Practices. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 5-9 www.oznet.ksu.edu

Shwankl, L.J., Grattan, R.S. and Miyao, M.E. 1990. Drip Irrigation Burial depth and seed planting depth effects on tomato germination. In Visions of the Future, Proc. 3rd National Irrigation Symposium, October 28-November 1, Phoenix, Arizona, ASAE , pp. 682-687.

Singh, B.R. and Singh, D.P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum maize and pearl millet to irrigation. Field Crops Res. 42, 57–67.

Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, Th. 2007. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three Dimentional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. pp. 19-70.

Smajstrla, A.G., Zazueta, F.S., Clark, G.A., Pitts, D.J. 2000. Irrigation Scheduling with Evaporation Pans. Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Bulletin 254, pp. 1-10. http://edis.ifas.ufl.edu

Smith, W.C. 2000. Sorghum: Origin, History, Technology and Production. John Wiley & Sons, Inc. pp. 99-131.

Snyder, R.L. 1992. Equation of evaporation pan to evapotranspiration conversions. Journal of Irrifation Drainage Enginnering 118(6): 977-980.

Solomon, K. H., Kincaid, D. C., and Bezdek, J. C. (1985). Drop size distributions for irrigation spray nozzles. Trans. ASAE, 28(6), 1966–1974.

Southwell, P.H. and Rothwell, T.M. 1977.Analysis of output/input energy ratios of food production in Ontario. Report to Eng. Research Service, Agriculture Canada, Ottawa, ON. pp. 419.

Spurgeon, W.E. and Manges, H.L. 1990. Drip line spacing and plant population for corn. In Proc. Of the 3rd National Irrigation Symposium, Phoenix, Arizona, October 28-November 1, pp. 217-222.

Spurgeon, W.E. and Makens, T.P. 1991. Irrigation management for LEPA systems. ASAE Paper No. 91-2519. St, Joseph, Mich. ASAE. pp. 18-25.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Spurgeon, W. E., Feyerherm, A. M., and Manges, H. L. (1995). In canopy application mode and soil surface modification for corn. Appl. Engrg. in Agric., 11(4), 517–522.

Srivastava, R.C., Ahmed, M. 1998. Design criteria for canal supply based pressurized irrigation system in high rainfall areas of eastern India. In: Progress in micro-irrigation research and development in India. Proceedings of national seminar on micro-irrigation research in India: Status and perspectives for 21st century, 27–28 July 1998, Bhubaneswar, pp 84–89

Srivastava, R.C., Upadhayay, A. 1998. Studies on feasibility of drip irrigation in shallow groundwater zones of eastern India. Agricultural Water Management 36: 71–83

Srivastava, C.R., Verma, Z.H., Mohanty, S., Pattnaik, K.S. 2003. Investment decision model for drip irrigation system. Irrigation Science, 22: 79-85.

Stanhill, G. 1986. Irrigation in arid lands. Phil. Trans. R. Soc. London A 316. pp. 261-273.

Stanhill, G. 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determiing irrigation water requirements? Agricultural and Forest Meteorology 112: 233-236.

Steduto, P., Katerji, N., Puertos-Molina, H., Ünlü, M., Mastrorilli, M. and Rana, G. 1997. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales. Field Crops Res. 54: 221–234.

Stewart, B. A., J. T. Musick, and D. A. Dusek. 1983. Yield and water use efficiency of grain sorghum in a limited irrigation-dryland farming system. Agronomy Journal 75(4): 629-634.

Stewart, A.B. 2008. Irrigation: Saline Water. In W.S. Timple "Encyclopedia of Water Science". 2nd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. pp. 662-663.

Stone, L.R., Gwin, Jr. R.E. and Dillion, M.A. 1978. Corn and grain sorghum yield response to limited irrigation. J Soil Water Conserv 33: 235 -238

Sutton, B.G., Stirzaker, J.R., Doney, J.C. and English, D.S. 1985. Solar powered drip irrigation for vegetables. In proc. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress. St. Joseph, Mich.: ASAE, 2: 589-593.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Swan, J.B., GrossKoff, D.M. and Tanner, B.C. 1963. Net radiation and evapotranspiration from irrigated snapbeans. Agronomy Abstracts, pp. 67.

Sweeney, W.D. and Lamm, R.F. 1993. Timing of limited irrigation and N-injection for grain sorghum. Irrigation Science, 14: 35-39.

Tanner, C.B. 1963. Basic Instrumentation and measurements for plantenvironment and microclimatology. Soil Bulletin, No. 6. University of Wisconsin. Madison. pp. 156.

Taylor, H.D., Bastos, R.K.X., Pearson, H.W. and Mara, D,D. 1995. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluent: solving the problem of emitter fouling. Water Science and Technology, 12: 417-424.

Taylor, K.R. 1998. Harvesting Grain Sorghum. In "Grain Sorghum Production Handbook" Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, Kansas. pp. 24-26. www.oznet.ksu.edu

Teutsch, C. 2009. Warm-season annual grasses for summer forage. Pub. 418-004. Virginia Cooperative Extension. Virginia Polytech. and State Univ., Blacksburg, VATexas Water Development Board. 1986. Survey of irrigation in Texas, 1958, 1964, 1969, 1974, 1979 and 1984. Rpt. No. 294. pp. 1-6. http://pubs.ext.vt.edu/418/418-004/418-004.html#L2

Thomas, A.W., Duke,R.H. and Kruse, G.E. 1977. Capillary potential distributions in root zones using subsurface irrigation. ASAE Trans. 20(1): 62-75.

Thompson, A. L., Gilley, J. R., and Norman, J. M. 1993. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: II. Model application. Trans. ASAE, 36(3), 743–750.

Thompson, A. L., Martin, D. L., Norman, J. M., Tolk, J. A., Howell, T.A., Gilley, J. R., and Schneider, A. D. 1997. Testing of a water loss distribution model for moving sprinkler systems. Trans. ASAE, 40(1), 81–88.

Tognetti, R., Palladino, M., Minnocci, A., Delfine, S. and Alvino, A. 2003. The response of sugar beet to drip and low-pressure sprinkler irrigation in Southern Italy. Agricultural Water Management, 60: 135-155.

Topp, G.C., Davis, L.J. and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxal transmission lines. Water Resources Research 16: 574-582.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Trooien, T. P., F. R. Lamm, L. R. Stone, M. Alam, D. H. Rogers, G. A. Clark, and A. J. Schlegel. 1999. Testing subsurface drip irrigation laterals with lagoon wastewater.. In: Proceedings of the Irrigation Association International Irrigation Show and Conference. Irrigation Association, Fairfax, VA. pp. 17-22.

Tsagarakis, P.K., Mara, D.D. and Angelakis, N.A. 2001. Wastewater management in Greece: experience and lessons for developing countries. Water Science & Technology, vol 44, No 6, pp 163–172.

Tyagi, K.N., Sharma, K.D. and Luthra, K.S. 2000. Evapotranspiration and crop coefficients of wheat and sorghum. Journal of Irrigation and Drainage Enginnering, vol. 126, No. 4. pp. 215-222.

Turner, N.C. and Burch, G.J. 1982. The role of water in plants. In Eds. I.D. Teare and M.M. Peet. Crop Water Relations. John Wiley & Sons. New York. pp. 73-126.

Turgut, I., Bilgili, U., Duman, A. and Acikgoz E. 2005. Production of sweet sorghum (sorghum bicolor L. Moench) increases with increased plant densities and nitrogen fertilizer levels. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant, 55: 236-240.

Unger, P. W. and A. F. Wiese. 1979. Managing irrigated winter wheat residue for water storage and subsequent dryland grain sorghum production. Soil Science Society of Americn Journal 43(3): 582-588.

Upchurch, D.R., Wanjura, D.F., Burke, J.J. and Mahan, J.R. 1996. Biologically-Identified Optimal Temperature Interactive Console (BIOTIC) for Managing Irrigation. U.S. Patent 5539637, July 23. pp. 1-13.

Van Arkel, H. 1978. Leaf area determinations in sorghum and maize by the length-width method. Neth. J. Agric. Sci. 26: 170–180.

Vanderlip, R.L. and Reeves, H.E. 1972. Growth Stagesof sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench]. Agronomy Journal, 64: 13-16.

Vanderlip, R.L. 1993. How a Sorghum plant develops. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. pp. 3-16. http://www.oznet.ksu.edu

Venturi, G., Lo Piparo, G., Amaducci, M.T. 1992. PRiSCA Project-Alternative crops. Agric. Ric. 132. pp. 83-92.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Venturi, P. and Venturi, G. 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. Biomass and Bioenergy 25: 235-255.

Verma, U.K. and Bains, S.S. 1974. A note on saline irrigation of wheat at various growth stages. Indian Journal of Agronomy 19: 80

Viets, F.G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Adv. Agron. 14, 223–264.

Wallach, R. 1990. Effective irrigation uniformity as related to root zone depth. Irrigation Science, 11: 15-21.

Wanjura, D.F., Upchurch, D.R. and Mahan, J.R. 1990. Evaluating decision criteria for irrigation scheduling of cotton. Trans. ASAE, 33(2): 512–518.

Wanjura, D.F., Upchurch, D.R. and Mahan, J.R. 1992. Automated irrigation based on threshold canopy temperature. Trans. ASAE, 35(1): 153–159.

Wanjura, D.F., Upchurch, D.R. and Mahan, J.R. 1995. Control of irrigation scheduling using temperature–time thresholds. Trans. ASAE, 38(2): 403–409.

Warrick, A.W., Lomen, O.D. and Amoozegar-Fard, A. 1980. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions. Soil Science Society of American Journal, 44(5): 911-914.

Watson, DJ. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. Annals of Botany 11, 41-76.

Webb, N., Nichol, C., Wood, J. and Potter. E. 2008. SunScan Canopy Analysis System type SS1. User Manual Version: 2.0. Delta-T Devices Ltd. pp. 49-61.

Wendt, C.W., Onken, B.A. Wilke, C.O. Hagrove, R., Bausch, W. and Barnes, L. 1977. Effect of irrigation systems on the water requirement of sweet corn. Soil Scienc society American Journal. 41(4): 785-788.

Welles, J. M. and Cohen, S. 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. Journal of Experimental Botany, 47(302), 1335–1342.

Wilhelm, W.W., Ruwe, K., and Schlemmer, R.M. 2000. Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. Crop Sci. 40: 1179-1183.

Whitney, L.F. and Lo, M.K. 1969. Plastic orifice inserts for subsurface irrigation. ASAE Trans. 12(5): 602-607.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Whitney, L.F. 1970. Review of subsurface irrigation in the Northeast. In Proc. National Irrigation Symposium, St. Joseph, Mich.: ASAE, pp. F1-F8.

Wright, G.C. and Smith, C.G. 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. II. Root water uptake and water use. Aust. J. Agric. Res. 34, 627–636.

Wright, G.C., Smith, R.C.G. and McWilliam, J.R. 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. I. Crop growth and yield responses. Aust. J. Agric. Res. 34, 615–626.

Wu, I-Pai. and H.M. Gitlin. 1979. The Manufacturer's coefficient of variation of emitter flow for drip irrigation. University of Hawaii at Manoa U.S.D.A. Cooperating: pp. 1-3.

Youngberg, G. and Buttel, F.H. 1984. Public policy and socio-politics factors affecting the future of Sustainable farming systems. In: D.F. Bezdicek, J.F., Power, D.R. Keeney and M.J. Wright (Editors). Organic Farming: Current Technologies and its Role in a sustainable Agriculture. ASA Madison W1, pp. 167-187.

Zetzsche, J.B. and Newman, S.J. 1966. Subirrigation with plastic pipe. Agricultural Engineering47(1): 74-75.

Zoldoske, F.D., Genito, S. and Jorgensen. S.G. 1995. Subsurface Drip Irrigation (SDI) on Turfgrass: A University Experience. California State University, Fresno, California 93740-0018. pp. 1-4. http://cati.csufresno.edu/CIT/rese/95/950104/index.html

Zoldoske, F.D., Striegler, K.R., Berg, T.G., Jorgensen, G., Lake, B.C., Graves, G.S. and Burnett, M. D. 1998. Evaluation of Trellis System and Subsurface Drip Irrigation for Wine Grape Production: A Progress Report. CATI Publication #950401. pp. 1-5. http://www.wateright.org/980401.asp

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

ABSTRACT

The use of conventional energy sources has created problems such as global warming, acid rain, etc. Moreover, the depletion of oil, gas and coal, require alternative energy sources to be used. Global agreements, EU directives and national laws require, recommend and encourage energy production from renewable sources. Biomass as well as wind, solar and other sources, is an inexhaustible energy source and characterized as green energy source while its use helps part of the continually increasing energy needs to be covered.

The waste of water, mainly from inefficient irrigation, imposes certain measures to be taken. The use of more efficient irrigation methods, the accurate estimation of crop water needs and the cultivation of water resistant crop plants are some of the measures against the wasting water problem. One of the efficient irrigation methods is the surface and subsurface drip irrigation. The subsurface drip irrigation method is an alternative of the surface one and applies the amount of water through laterals placed at various depths below the surface. When these methods are equipped with technological advances the production cost is reduced provided that the systems are organized, operated and maintained properly.

This study was contacted to evaluate: a) the cultivation of energy plant sorghum in low-input farming conditions, b) the effect of deficit irrigation methods of surface and subsurface drip irrigation on growth and biomass production of sorghum plant, c) the surface drip irrigation method by using soil moisture probe, d) the effect of different amount of water in growth and production of biomass energy plant sorghum, e) the comparison of surface and subsurface drip irrigation in terms of saving water and water use efficiency in sorghum , f) to compare the application of three amounts of water by using subsurface and surface drip irrigation economically, g) the method of calculating the leaf area index by using digital

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

photos and editing them through AutoCAD computer program, h) the model equations for predicting the crop production by using the multiple linear regression method. The ultimate goal of the research is to maximize the energy benefit from cultivating the energy plant sorghum by using intelligent irrigation regulation.

The research was conducted at an experimental field of the University of Thessaly experimental Farm in Velestino area of Magnesia prefecture. In this experimental field were installed surface and subsurface drip irrigation systems the installation of soil moisture sensors and a complete automated surface drip irrigation system. The research was done during the growing seasons of 2007, 2008 and 2009. The soil's structure was to clay to sandy clay or sandy clay loam.

A complete randomized block of seven treatments in four replications was organized. The seven treatments were: a) Subsurface drip irrigation with amount of water equal to 100% of the daily evapotranspiration (ET) (Y100), b) Subsurface drip irrigation with supplied amount of water equal to 70% of ET (Y70), c) Subsurface drip irrigation with supplied amount of water equal to 50% of ET (Y150), d) Surface drip irrigation with supplied amount of water equal to 100% of ET (E100), e) Surface drip irrigation with supplied amount of water equal to 70% of ET (E70), f) Surface drip irrigation with supplied amount of water equal to 50% of ET (E5) and g) Complete automated surface drip irrigation with supplied amount of water equal to 100% of ET (A100).

Subsurface laterals were installed by using a special subsurface installer at a depth of 0.45m under the soil surface. Polyethylene laterals of 20mm inside diameter spaced 1.6m apart. The laterals were equipped with self-regulated and self-cleaned emitters, spaced 0.8m apart and delivered water at a rate of 2.3L/h when the operation pleasure level was between 0.5 and 1.0Atm.

The calculation of reference evapotranspiration (ET_o) and the irrigation was programmed by using evaporation pan class A methodology. That methodology was used to calculate the amount of irrigated water for the fully irrigated treatments (E100 and Y100). The amount of water for the deficit irrigated treatments was calculated as a percentage of the full amount of water. The amount of water for the A100 treatment was determined by the rate of depletion of soil moisture as it was recorded by a soil moisture sensor. The irrigation interval was preordained to be two days while in the A100 treatment the irrigation interval was determined by the rate

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

production of dry biomass was affected by the application of different amounts of irrigated water and different irrigation methods. The energy balance is positive for all treatments. The Y70 treatment tends to have greater energy balance compared with the treatments A100, E50, E70, E100, Y50 and Y100, respectively. The E50 treatment gave a quite high positive energy balance although only 50% of its water needs were covered.

The study of the soil moisture measures showed that in the deficit subsurface drip irrigation treatments the soil moisture was higher than the surface ones. Deep percolation was not observed during the three-year research while in the E50 treatment the soil moisture was enough during the anthesis stage when sorghum seems to be more sensitive to water stress. Especially for the A100 treatment the soil moisture fluctuated between 24% and 32% which are the operation limits of the automated irrigation system. The study of root area measures showed that the irrigation frequency did not affect the root distribution and length. The root developed up to 50cm in length at least. Thus, the root was developed up to the depth of the subsurface lateral, at least, while the maximum root density was observed at the upper 30cm of the soil. The root area was 466m^2; the maximum root length was measured at 50cm deep while the maximum wide measured at 35cm.

The study of irrigated water use efficiency (IWUE) showed that the subsurface drip irrigation applies the irrigation water more efficiently than the surface one. Among the treatments, water use efficiency was higher in deficit irrigated treatments. During the growing seasons of 2008 and 2009 the greater water use efficiency was observed in Y70 treatment.

The economic analysis included a study of the gross profit, direct costs, direct production costs and gross margin. As for the studied economical parameters, the subsurface drip irrigation was exceeded over the surface one. The extra cost of buying the equipment of A100 treatment does not affect the economy of the crop, significantly, compared with the E100 treatment.

The study shows that implementation of appropriate cultivation techniques in conjunction with the use of modern technology increase the economical benefit to the farmer. Furthermore, taking into account the environmental benefits by reducing the emission of pollutants and maintain carbon dioxide balance stable, it is understood that the energy plant sorghum is a promising crop particularly when it is

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

of soil moisture depletion. The average water savings between pairs of treatments E50-Y50, Y70-E70 and E100-Y100 was 18.7%, 16.7% and 9.4% respectively. Especially for the A100 treatment, the average water saving during the years 2008-2009 reached at 10.1% compared to the E100 treatment.

The modelling of crop production characteristics was done by using the multiple linear regression methodology. The productive characteristics of the crop were the height of central stem of the plant, the leaf area index (LAI) and the production of dry biomass. The problem was multivariate and strongly nonlinear. To solve this problem the non-linear model linearized by using the natural logarithm (ln) in all parameters and then to the linear model the multiple linear regression method was used. The height of the plant, the LAI and the dry biomass were the dependent variables (Y) while the independent variables were the irrigation (X_1), the sunshine (X_2), the precipitation (X_3), the temperature of the atmosphere (X_4), the soil moisture (X_5), the relative humidity of the atmosphere (X_6), and the duration of the day (X_7).

The leaf area index (LAI) ranged lower in deficit irrigated treatments than those who received a full amount of irrigation water including Y70 treatment. Differences between the deficit irrigated treatments and fully irrigated ones were significant. The statistical analysis of LAI measurements using the method SunScan and the area-measured method by AutoCAD program showed that there were no differences between the two methods. The leaf area index of the E100, Y100 and Y70 treatments depends on irrigation and rainfall. However, the leaf area index in the deficit irrigated treatments depends on irrigation and soil moisture.

During the three-year research differences in plant growth were observed. Subsurface drip irrigated plants were higher than the surface irrigated ones. Similarly, fully irrigated plants achieved higher growth rates than deficit irrigated ones. Furthermore it is clear that the height of the plants depends on irrigation only.

The maximum biomass production was observed in fully subsurface drip irrigated treatments. The mean maximum biomass production was observed in Y100 treatment. The treatments E70, E50 and Y50 achieved acceptable dry biomass production. No significant difference was observed between the E100 and A100 treatments, during the years 2008-2009. In addition, it seems that the dry biomass depends on irrigation only. Energy production was affected in a similar way to the

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31

cultivated under low-input farming conditions, irrigated deficiently by using new technologies and fully automated irrigation systems.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
17/04/2024 16:40:10 EEST - 3.147.43.31