

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή
καινοτόμων συστημάτων άρδευσης
και επίδραση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ. ΒΥΡΛΑΣ
Τεχνολόγος Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων
MSc Αρδευτικής Μηχανικής

2007

**Εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων άρδευσης
και επίδραση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών**

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.

Γέμτος Θεοφάνης, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργική Μηχανολογία», μέλος.

Τζιμόπουλος Χρήστος, Ομότιμος Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργική Υδραυλική», 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.

Γέμτος Θεοφάνης, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργική Μηχανολογία», μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

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

Καραμούζης Διαμαντής, Καθηγητής, Γεωπονική Σχολή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με γνωστικό αντικείμενο «Υπόγεια νερά και Στραγγίσεις Εδαφών», μέλος.

Καραντούνας Γεώργιος, Καθηγητής, Τμήμα Διαχείρισης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, με γνωστικό αντικείμενο «Υδραυλικά Έργα στη Γεωργία», μέλος.

Δημήτρου Ανθούλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με γνωστικό αντικείμενο «Εδαφολογία-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.

Παναγιώτης Γ. Βύρλας

**Εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων άρδευσης
και επίδραση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών**

ISBN



Στην μνήμη του πατέρα μου Γιώργου Βύρλα
και του Δασκάλου μου Δημήτρη Νιφλή

Περίληψη

Βύρλας, Π., 2007. Εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων άρδευσης και επίδραση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Μαγνησίας.

Αριθμός προκαταρκτικών σελίδων: 28

Συνολικός αριθμός σελίδων: 295

Αριθμός πινάκων: 13

Αριθμός εικόνων: 78

Αριθμός βιβλιογραφικών παραπομπών: 338

Η προσπάθεια για την επίτευξη μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας κατά την εφαρμογή του νερού στις αρδεύσεις, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών και ποικίλων μεθόδων άρδευσης. Η στάγδην άρδευση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις σύγχρονες μεθόδους άρδευσης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού, τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υπόγεια εφαρμογή της. Το σύστημα υπόγεια στάγδην άρδευσης αποτελεί μία παραλλαγή του ευρέως διαδεδομένου συστήματος άρδευσης με σταγόνες, στην οποία οι πλευρικοί αγωγοί τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αντί να τοποθετούνται επιφανειακώς.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν: (i) η σύγκριση της υπόγεια με την επιφανειακή στάγδην άρδευση με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού, (ii) η ανάπτυξη μιας διαδικασίας υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου άρδευσης, (iii) η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών εφαρμογής του νερού από το σύστημα άρδευσης, (iv) η διερεύνηση της πιθανότητας βελτίωσης της απόδοσης της καλλιέργειας με τη χρήση αυτών των τεχνικών και (v) η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της παραγωγικότητας της καλλιέργειας και κλιματικών δεδομένων και αρδευτικού νερού.

Έγιναν πειράματα ζαχαροτεύτλων σε αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όπου εγκαταστάθηκαν συστήματα υπόγεια και

viii ΠΕΡΙΛΗΨΗ

επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν την τριετία 2003-2005 σε πειραματικό αγρό με έδαφος αργιλοπηλώδες.

Το πειραματικό σχέδιο περιελάμβανε οχτώ μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν: i) Επιφανειακή εφαρμογή νερού με σταγόνα, ii) Επιφανειακή διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα, iii) Επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα δια της βαρύτητας, iv) Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα, v) Υπόγεια διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα, vi) Υπόγεια εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα δια της βαρύτητας, vii) Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με ταυτόχρονη εφαρμογή αέρα και viii) Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης.

Οι υπόγειοι αγωγοί εφαρμογής (σταλακτηφόροι) τοποθετήθηκαν με τη χρήση υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45 m, ενώ η ισαποχή των αγωγών ήταν 1,0 m και στα δύο συστήματα. Στον πειραματικό αγρό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Προσδιορίστηκαν επίσης οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους και η υδραυλική αγωγιμότητα και καταγραφόταν η ποσότητα του νερού που εφαρμοζόταν σε κάθε άρδευση. Στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου γινόταν η συλλογή των φυτών, χειρωνακτικά.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής (ET) και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων ακολούθησαν την μεθοδολογία FAO-56. Η μεθοδολογία που παρατίθεται από το FAO-56 δεν πραγματεύεται την περίπτωση της μεθόδου άρδευσης με υπόγεια σταγόνα. Στην παρούσα έρευνα λήφθηκε υπόψη η μη διαβροχή του επιφανειακού εδάφους. Ως τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, ήταν η σημαντική εξοικονόμηση αρδευτικού νερού που επιτεύχθηκε στην υπόγεια στάγδην σε σχέση με την επιφανειακή. Το ποσοστό του νερού που εξοικονομήθηκε για κάθε αρδευτική περίοδο ανήλθε στο 13,2% το 2003, στο 11,2% το 2004 και στο 11,5% το 2005.

Όσον αφορά την ανάπτυξη της καλλιέργειας, ο LAI επηρεάστηκε πρόσκαιρα από την άρδευση αφού κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως σε σχέση με τις επιφανειακές αλλά επανέκαμψε και έφθασε σχεδόν στα επίπεδα των επιφανειακών μεταχειρίσεων.

Η τεχνική εφαρμογής του νερού είχε σημαντική επίδραση στην παραγωγή. Και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Ο ζαχαρικός τίτλος σε καμία από τις περιόδους δεν παρουσίασε συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Έτσι, οι αρδευόμενες με

διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα και τα τρία έτη. Η περιεκτικότητα των μελασσογόνων συστατικών στις ρίζες των τεύτλων επίσης δεν επηρεάσθηκε σημαντικά από την άρδευση καθώς δεν σημειώνονται σημαντικές και συστηματικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Από την αξιολόγηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού προέκυψε ότι η υπόγεια διακοπτόμενη άρδευση αξιολογείται ως η πλέον αποδοτική τεχνική που εφαρμόσθηκε, αφού παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές τόσο σε αποδοτικότητα νερού άρδευσης όσο και σε συνολική αποδοτικότητα και για τα τρία έτη πειραματισμού.

Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας δείχνει πως η διακοπτόμενη άρδευση, τόσο στο επιφανειακό όσο και στο υπόγειο σύστημα, παρήγαγε μεγαλύτερες επιφάνειες διαβροχής. Η καταγραφή της υγρασίας στην εδαφική κατατομή έδειξε πως στις εφαρμογές διακοπτόμενης άρδευσης η ομοιομορφία της υγρασίας ήταν καλύτερη σε σχέση με αυτήν της συνεχούς εφαρμογής.

Γενική διαπίστωση αποτελεί η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υπόγειο σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Στην περίπτωση άρδευσης με χαμηλή παροχή η καθοδική κίνηση του νερού είναι μεγαλύτερη και η οριζόντια μικρότερη από τις άλλες μεταχειρίσεις. Η ανάπτυξη της διαβροχής με το χρόνο στην επιφανειακή διακοπτόμενη άρδευση, περιγράφεται με μια γραμμική εξίσωση εν αντιθέσει με την εκθετική που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της στη συμβατική στάγδην άρδευση.

Με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου των συζυγών διευθύνσεων προσεγγίσθηκαν πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα και παρήχθη μια σχέση πρόβλεψης της παραγωγικότητας των ζαχαροτεύτλων συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα εκφρασμένη σε βαθμοημέρες, της ηλιακής ακτινοβολίας και του αρδευτικού νερού που εφαρμόζεται.

Η έρευνα αυτή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιορίζονται στην καλλιέργεια και τον τύπο εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν. Παρ' όλα αυτά, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι οι προτεινόμενες τεχνικές άρδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παραγωγούς. Κι αυτό βέβαια με τη σκέψη ότι η συστηματική αξιολόγηση των μεθόδων αυτών με επιπλέον πειραματικά αποτελέσματα παραμένει ένα κρίσιμο ζήτημα είτε, προορίζονται για πρακτική εφαρμογή, είτε για βελτίωση της υπάρχουσας γνώσης.

X

Πρόλογος

Η άρδευση σε όλο τον κόσμο αντιμετωπίζει αυξημένη πίεση για βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού και μείωση των επιδράσεων στο περιβάλλον. Η στάγδην άρδευση παρουσιάζεται ως μια μέθοδος που βοηθά στην επίτευξη αυτών των στόχων. Για να επιτύχει όμως, τα συστήματα στάγδην πρέπει να σχεδιάζονται και να διαχειρίζονται αποτελεσματικά έτσι ώστε, το νερό και τα θρεπτικά ή αγροχημικά να εφαρμόζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να μεγιστοποιείται η πρόσληψη νερού και θρεπτικών από τα φυτά και να ελαχιστοποιείται η έκπλυση θρεπτικών και χημικών από το ριζόστρωμα. Για αυτό υπάρχει μια συνεχιζόμενη προσπάθεια για αξιολόγηση και συνεχή βελτίωση του σχεδιασμού και της διαχείρισης των συστημάτων αυτών.

Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας, εντάσσεται και το αντικείμενο της έρευνας αυτής, η οποία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στα πλαίσια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Τον σημαντικότερο και ουσιαστικότερο ρόλο στην εκπόνηση αυτής της διατριβής έπαιξε η κ. Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Διευθύντρια του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, η οποία ως επιβλέπουσα της διατριβής, με καθοδήγηση αλλά και μου συμπαραστάθηκε αμέριστα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της έρευνας. Την ευχαριστώ λοιπόν θερμά για τον χρόνο που διέθεσε, για τη φιλική της διάθεση και για την εμπιστοσύνη της.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω θερμά:

Τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Χρήστο Τζιμόπουλο, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της έρευνας και τις υποδείξεις του στη διαμόρφωση της δομής της διατριβής. Η παρουσία του ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, ήταν καθοριστική για την περάτωση της διατριβής αυτής.

Τον ευχαριστώ εγκάρδια, για τον χρόνο που διέθεσε αλλά κυρίως για την πατρική του καθοδήγηση και συμπαράσταση.

Τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, κ. Θεοφάνη Γέμτο, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις υποδείξεις του, για τον χρόνο που διέθεσε αλλά και για την άψογη συνεργασία κατά τα είκοσι περίπου χρόνια της γνωριμίας μας.

Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Διαμαντή Καραμούζη, Καθηγητή της Γεωπονικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, τον κ. Γεώργιο Καραντούνια, Καθηγητή του Τμήματος Διαχείρισης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, την κ. Ανθούλα Δημήρκου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Π.Θ. και τον κ. Ιωάννη Καλαβρουζιώτη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,

Την «ομάδα» του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, κ. Νικόλαο Παπανίκο, ΕΕΔΙΠ του Εργαστηρίου, την Δρα Αναστασία Αγγελάκη και τους υποψηφίους διδάκτορες κ.κ. Ιωάννη Βαγενά, Δημήτριο Παπαλέξη και Χρήστο Παπανικολάου, όπως επίσης και τον υπεύθυνο του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου στο Βελεστίνο, κ. Σπύρο Σουίπα.

Τους φίλους, συνεργάτες και σύντεκνους, κ.κ. Ιωάννη Αλεξίου και Δημήτριο Καλφούντζο, Ερευνητές του Ινστιτούτου Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας, του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., για τις συμβουλές και την ηθική και όχι μόνον συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας αυτής.

Τέλος ευχαριστώ τα μέλη της οικογενείας μου για την κατανόηση που επέδειξαν και την ηθική στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής αυτής.

Βόλος 2007

Παναγιώτης Γ. Βύρλας

Ειδικές Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων με συγχρηματοδότηση από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω του προγράμματος υποτροφιών έρευνας για υποψηφίους διδάκτορες «ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ - Υποτροφίες Έρευνας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας» στα πλαίσια του 2^{ου} Επιχειρησιακού Προγράμματος Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ).



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΠΑΙΔΕΙΑ ΜΠΡΟΣΤΑ
2^ο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Εκπαίδευσης και Αρχικής
Επαγγελματικής Κατάρτισης

Πίνακας Περιεχομένων

	Σελίδα
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
Πρόλογος	ix
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος εικόνων	xix
Κατάλογος πινάκων	xxiv
Κατάλογος συμβόλων	xxv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Γενικά	1
1.2 Σκοπός της διατριβής	7
1.3 Δομή της διατριβής	11
1.4 Συμβολή της εργασίας	12
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
2.1 Γενικά	13
2.2 Υπόγεια στάγδην άρδευση (ΥΣΑ)	14
2.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά της ΥΣΑ	14
2.2.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου	15
2.2.3 Μειονεκτήματα της μεθόδου	15
2.3 Ορισμός της υπόγειας στάγδην άρδευσης	16
2.4 Ιστορική ανασκόπηση	17
2.5 Τεχνολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	19
2.5.1 Βάθος και ισαποχή αγωγών εφαρμογής	19
2.5.2 Διαχείριση αρδεύσεων	21
2.5.3 Σχεδιασμός και αξιολόγηση του συστήματος	26
2.5.4 Σύγκριση με άλλες μεθόδους	32
2.5.5 Οικονομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα	34
2.5.6 Περιορισμοί	36

xvi ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

2.6 Η καλλιέργεια των ζαχαροτεύλων	37
2.6.1 Καταγωγή και διάδοση	37
2.6.2 Οικολογικές απαιτήσεις: έδαφος-θερμοκρασία-υγρασία-φως	37
2.6.3 Καλλιεργητική τεχνική	37
2.7 Επίδραση της άρδευσης στα ζαχαρότευτλα	39
2.7.1 Νερό και ανάπτυξη της καλλιέργειας	39
2.7.2 Επίδραση της άρδευσης στην ποσοτική και ποιοτική απόδοση των ζαχαροτεύλων	40
2.8 Συμπεράσματα	44
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ Α: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Στοιχεία πειραματικού αγρού	45
3.2.1 Εδαφικές παράμετροι	46
3.2.2 Καλλιέργεια	47
3.3 Πειραματικό σχέδιο	49
3.4 Σχεδιασμός συστημάτων άρδευσης	52
3.4.1 Εγκατάσταση βασικού συστήματος	52
3.4.2 Το σύστημα χαμηλής παροχής με βαρύτητα	56
3.4.3 Διατάξεις παροχής αέρα	57
3.5 Όργανα και μετρήσεις	59
3.5.1 Ποσότητα νερού	59
3.5.2 Εδαφική υγρασία	59
3.5.3 Ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας	65
3.5.4 Μετεωρολογικά δεδομένα	68
3.6 Επεξεργασία δεδομένων	68
4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ Β: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	
4.1. Εισαγωγή	69
4.2. Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής	70
4.2.1. Εξάτμιση (E)	70
4.2.2. Διαπνοή (T)	71
4.2.3. Εξατμισοδιαπνοή (ET)	72

4.2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή	72
4.2.5. Ορισμοί και έννοιες της ET	74
4.3 Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET _o)	77
4.3.1. Η εξίσωση Penman-Monteith κατά FAO	77
4.3.2. Διαδικασία υπολογισμού με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου	78
4.4 Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας	79
4.4.1 Μέθοδοι υπολογισμού της ET _c	79
4.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τον φυτικό συντελεστή	80
4.4.3 Μέθοδοι υπολογισμού του K _c	82
4.4.4 Υπολογισμός της ET _c	87
4.5 Υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET _{act})	102
4.5.1 ET _c υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης	102
4.5.2 Συντελεστής υδατικής καταπόνησης	102
4.5.3 Διαθέσιμη υγρασία	104
4.5.4 Προγραμματισμός των αρδεύσεων	108
5. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	
5.1 Εισαγωγή	109
5.2. Εξατμισοδιαπνοή ζαχαροτεύτλων	110
5.2.1 Κλιματικά δεδομένα και εξατμισοδιαπνοή αναφοράς	110
5.2.2 Φυτικοί συντελεστές και εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας	118
5.3 Αρδεύσεις και εξοικονόμηση νερού	127
5.3.1 Αρδεύσεις	127
5.3.2 Εξοικονόμηση αρδευτικού νερού	131
5.4 Συζήτηση	134
6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	
6.1 Εισαγωγή	137
6.2 Επίδραση της άρδευσης στην ανάπτυξη της καλλιέργειας	137
6.2.1 Φυλλική επιφάνεια	137
6.2.2 Σχέση βάρους ριζών – φύλλων και κορυφών	141
6.3 Επίδραση της άρδευσης στην απόδοση της καλλιέργειας	143
6.3.1 Παραγωγή ριζών	143
6.3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά παραγωγής	150

xviii ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

6.4 Αποδοτικότητα χρήσης νερού	156
6.5 Συζήτηση	160
7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΥΓΡΑΣΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	
7.1 Εισαγωγή	165
7.2 Επίδραση της άρδευσης στην εδαφική υγρασία	165
7.2.1 Διακύμανση της υγρασίας	166
7.2.2 Κατανομή της υγρασίας στην εδαφική κατατομή	172
7.3 Επίδραση της άρδευσης στην διαβροχή του εδάφους	178
7.3.1 Επιφανειακή διαβροχή	179
7.3.2 Διαβροχή στο βάθος του εδάφους	181
7.4 Συζήτηση	187
8. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	
8.1 Εισαγωγή	191
8.2 Γενικότητες	192
8.3 Μορφή αλγορίθμου βελτιστοποίησης	195
8.3.1 Μερικό πρόβλημα εύρεσης του μήκους βήματος λ_k	196
8.4 Τετραγωνικές μορφές	197
8.5 Η μέθοδος της μεγαλύτερης αλλαγής	198
8.6 Μέθοδος των συζυγών διευθύνσεων	200
8.7 Σχέση παραγωγικότητας-κλιματικών δεδομένων-νερού	210
8.8 Συζήτηση	218
9. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	
9.1 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα	219
9.2 Προτάσεις επέκτασης της έρευνας	227
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	229
Παράρτημα: Μέθοδος υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ΕΤο)	257
Abstract	265

Κατάλογος Εικόνων

Σελίδα

3.1	Ο εδαφικός τύπος, η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b), η διαθέσιμη υγρασία (AW) και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (K_s) σε κάθε στρώση του εδάφους του πειραματικού αγρού	48
3.2	Σχηματική αναπαράσταση των τεχνικών κατά την διάρκεια μιας τυπικής άρδευσης. ΕΣ: Συνεχής επιφανειακή, ΥΣ: Συνεχής υπόγεια, ΕΔ: διακοπτόμενη επιφανειακή, ΥΔ: διακοπτόμενη υπόγεια, ΕΒ: επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής, ΥΒ: υπόγεια εφαρμογή χαμηλής παροχής, ΑΣ: συνεχής εφαρμογή αέρα, ΑΤ: εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης	50
3.3	Η διάταξη των φυτών και των αγωγών εφαρμογής στο πειραματικό τεμάχιο	51
3.4	Η θέση των αγωγών εφαρμογής στο επιφανειακό και στο υπόγειο σύστημα, αντιστοίχως	52
3.5	Η κεφαλή ελέγχου των συστημάτων άρδευσης με κανονική παροχή	54
3.6	Ο σταλάκτης RAM που χρησιμοποιήθηκε	55
3.7	Άποψη του συστήματος χαμηλής παροχής δια της βαρύτητας	56
3.8	Η σύνδεση του σωλήνα venturi στην γραμμή άρδευσης	57
3.9	Η διάταξη μέτρησης εδαφικής υγρασίας Moisture Point	62
3.10	Το σημείο τοποθέτησης του ανιχνευτή για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας	63
3.11	Η διάταξη μέτρησης εδαφικής υγρασίας Trime FM	64
4.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την ET	74
4.2	Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c) και πραγματική εξατμισοδιαπνοή ($ET_c \text{ Act}$). K_c : Φυτικός συντελεστής, K_{cb} : Βασικός φυτικός συντελεστής, k_e : συντελεστής εξάτμισης, k_s : συντελεστής υδατικής καταπόνησης.....	76
4.3	Η επίδραση της εξάτμισης στον φυτικό συντελεστή K_c . Η οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει τον K_c όταν η εδαφική επιφάνεια παραμένει συνεχώς υγρή. Η καμπύλη αντιπροσωπεύει τον K_c όταν η εδαφική επιφάνεια παραμένει ξηρή	80

	αλλά τα φυτά λαμβάνουν επαρκές νερό για πλήρη διαπνοή. K_{cb} : Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e : συντελεστής εξάτμισης.....	
4.4	Τυπικό εύρος μεταβολής του K_c κατά τα τέσσερα στάδια ανάπτυξης	82
4.5	Καμπύλες φυτικού συντελεστή που δίδουν τον βασικό K_{cb} (πράσινη γραμμή), τον συντελεστή εξάτμισης K_e (κόκκινη γραμμή) και την αντίστοιχη καμπύλη του φυτικού συντελεστή $K_c = K_{cb} + K_e$ (διακεκομμένη γαλάζια γραμμή)	85
4.6	Διάγραμμα ροής που δείχνει την γενική διαδικασία υπολογισμού της ET_c	86
4.7	Ο συντελεστής μείωσης της εξάτμισης από το έδαφος, K_r . REW: ευκόλως εξατμίσιμο νερό, TEW: συνολικό εξατμίσιμο νερό	90
4.8	Προσδιορισμός του f_{ew} (σκιασμένη περιοχή) σε σχέση με το τμήμα φυτοκάλυψης της επιφάνειας του εδάφους (f_c) και το τμήμα της διαβρεχόμενης επιφάνειας (f_w)	94
4.9	Υδατικό ισοζύγιο του επιφανειακού στρώματος του εδάφους	97
4.10	Επίδραση της διαβροχής του εδάφους στον φυτικό συντελεστή	100
4.11	Συντελεστής υδατικής καταπόνησης, K_s . RAW = Διαθέσιμη υγρασία, TAW = Ωφέλιμη υγρασία	103
4.12	Η επίδραση της υδατικής καταπόνησης στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας	104
4.13	Υδατικό ισοζύγιο στο ριζόστρωμα	106
5.1	Τιμές σχετικής υγρασίας αέρα κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	112
5.2	Τιμές θερμοκρασίας αέρα κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	113
5.3	Τιμές ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	114
5.4	Τιμές ταχύτητας ανέμου κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	115
5.5	Τιμές βροχόπτωσης κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	116
5.6	Τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους ..	117
5.7α	Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2003 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός συντελεστής)	121
5.7β	Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2004 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός	122

συντελεστής)	
5.7γ Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2005 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός συντελεστής)	123
5.8 Η διακύμανση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας όπως υπολογίσθηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση	126
5.9 Η κατανομή και το ύψος των αρδεύσεων για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση (ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά)	129
5.10 Το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας όπως υπολογίσθηκε για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) εφαρμογή της σταγόνας, για κάθε καλλιεργητική περίοδο (FC: υδατοϊκανότητα, LAM: ελάχιστη επιτρεπόμενη υγρασία, RAW: ωφέλιμη υγρασία, ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά)	130
5.11 Η διακύμανση της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους όπως υπολογίσθηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση (ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά)	132
5.12 Το έλλειμμα υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους όπως υπολογίσθηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση (TEW: συνολικό εξατμίσιμο νερό, REW: ευκόλως εξατμίσιμο νερό, ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά)	133
6.1α Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2003	138
6.1β Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2004	139
6.1γ Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2005	140
6.2 Συμμετοχή των ριζών στην ξηρή μάζα του φυτού κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, για τα τρία έτη πειραματισμού	142
6.3α Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2003	144
6.3β Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2004	144

xxii ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

6.3γ Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2005	145
6.3δ Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για τα τρία έτη	145
6.4 Ομοιομορφία βάρους ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση ομοιομορφία βάρους για τα τρία έτη	147
6.5 Μήκος ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέσο μήκος για τα τρία έτη	148
6.6 Συχνότητα διαμέτρου ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους	149
6.7 Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές ζαχαρικού τίτλου για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση τιμή ζαχαρικού τίτλου για τα τρία έτη	151
6.8 Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ζάχαρης για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση παραγωγή ζάχαρης για τα τρία έτη	152
6.9 Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές οικονομικής προσόδου για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση πρόσοδος για τα τρία έτη	153
7.1α Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 0-15 cm σε κάθε μεταχείριση ...	167
7.1β Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 15-30 cm σε κάθε μεταχείριση .	168
7.1γ Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 30-60 cm σε κάθε μεταχείριση .	169
7.1δ Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 60-90 cm σε κάθε μεταχείριση .	170
7.1ε Η μεταβολή της εδαφ. υγρασίας σε βάθος 90-120 cm σε κάθε μεταχείριση	171
7.2α Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΣ	173
7.2β Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΔ	173
7.2γ Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΣ	174
7.2δ Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΔ	174
7.2ε Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΒ	175
7.2στ Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΒ	175
7.2ζ Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΑΣ	176

7.2η	Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΑΤ	176
7.3	Η μεταβολή της διαμέτρου διαβροχής στην επιφάνεια του εδάφους στις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις	180
7.4α	Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή ΕΣ (επάνω) και διακοπτόμενη ΕΔ (κάτω) επιφανειακή εφαρμογή του νερού	183
7.4β	Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή ΥΣ (επάνω) και διακοπτόμενη ΥΔ (κάτω) υπόγεια εφαρμογή του νερού	184
7.4γ	Καταγραφή του υγρού μετώπου στην επιφανειακή ΕΒ (επάνω) και υπόγεια ΥΒ (κάτω) εφαρμογή του νερού με χαμηλή παροχή	185
7.4δ	Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή εφαρμογή αέρα ΑΣ (επάνω) και στην εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης ΑΤ (κάτω)	186
8.1	Διάγραμμα συσχέτισης μετρημένης (Υ) και υπολογισμένης (Υ') παραγωγής	211
8.2	Μετρημένες (Υ) και υπολογισμένες (Υ') με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων τιμές παραγωγής	211
8.3α	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 1,5 GJ m ⁻²	212
8.3β	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 2,0 GJ m ⁻²	213
8.3γ	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 2,5 GJ m ⁻²	214
8.3δ	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 3,0 GJ m ⁻²	215
8.3ε	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 3,5 GJ m ⁻²	216
8.3στ	Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας 4,0 GJ m ⁻²	217

Κατάλογος Πινάκων

	Σελίδα
1.1 Μέθοδοι άρδευσης των ζαχαροτεύτλων στην Ελλάδα και ποσοστιαία αναλογία αυτών επί της καλλιεργούμενης έκτασης	4
4.1 Κριτήρια επιλογής μεθόδου απλού και διπτού φυτικού συντελεστή	83
5.1 Ημέρα του έτους κατά την οποία έγινε η σπορά και παρατηρήθηκε η αλλαγή των σταδίων της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων	119
5.2 Φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς	119
5.3 Τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής όπως υπολογίσθηκαν για κάθε έτος και βλαστικό στάδιο στην επιφανειακή και στην υπόγεια στάγδην άρδευση αντιστοίχως	124
6.1 Τιμές καλίου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης	155
6.2 Τιμές νατρίου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης	155
6.3 Τιμές αμινο-αζώτου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης	155
6.4 Η Αποδοτικότητα της χρήσης νερού ως προς την παραγωγή ριζών	159
6.5 Η Αποδοτικότητα της χρήσης νερού ως προς την παραγωγή ζάχαρης	159
7.1 Παράμετροι αξιολόγησης της διαβροχής του εδάφους	177
7.2 Παράμετροι εκτίμησης της διαβρεχόμενης διαμέτρου με τις αντίστοιχες τιμές του R^2	180
8.1 Τιμές παραμέτρων της Εξίσωσης 8:1 και Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE) ...	210

Κατάλογος Συμβόλων

a_s+b_s	κλάσμα της εξωγήινης ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης μια ημέρα ολικής αιθρίας, [-]
c_p	ειδική θερμότητα του αέρα, [MJ Kg ⁻¹ °C ⁻¹]
CR	τριχοειδής ανύψωση, [mm day ⁻¹]
D_e	αθροιστικό ύψος εξάτμισης από τα επιφανειακά στρώματα εδάφους, [mm]
D_r	αθροιστικό ύψος εξατμισοδιαπνοής από τη ζώνη ριζοστρώματος, [mm]
d_r	σχετική απόσταση γης ηλίου, [-]
D_w	διάμετρος διαβροχής, [mm]
DP	βαθιά διήθηση, [mm]
DP_e	βαθιά διήθηση από στρώση εξάτμισης, [mm]
E	εξάτμιση, [mm day ⁻¹]
$e^o(T)$	πίεση κορεσμού υδρατμών σε θερμοκρασία αέρα, [kPa]
e_s	πίεση κορεσμού υδρατμών για δεδομένη χρονική περίοδο, [kPa]
e_a	πραγματική πίεση κορεσμού, [kPa]
e_s-e_a	έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών,
ET	εξατμισοδιαπνοή, [mm day ⁻¹]
ET_o	εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς, [mm day ⁻¹]
ET_c	εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, [mm day ⁻¹]
$ET_{c act}$	πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, [mm day ⁻¹]
$\exp[x]$	βάση των φυσικών λογαρίθμων, 2,7183
f_c	μέρος της επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από την καλλιέργεια, [-]
f_w	κλάσμα της επιφάνειας του εδάφους που διαβρέχεται από βροχή ή άρδευση, [-]
f_{ew}	κλάσμα της επιφάνειας του εδάφους που είναι όλο εκτιθέμενο και διαβρέχεται και από το οποίο γίνεται η εξάτμιση, [-]
G	ροή της αισθητής θερμότητας στο έδαφος, [MJ m ⁻² day ⁻¹]
G_{sc}	ηλιακή σταθερά, [0,0820 MJ m ⁻² min ⁻¹]

xxvi ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

h	ύψος της καλλιέργειας, [m]
l	ύψος άρδευσης, [mm]
l_w	ύψος άρδευσης για το μέρος της επιφάνειας που διαβρέχεται, [mm]
J	αριθμός της ημέρας του έτους, [-]
K_c	φυτικός συντελεστής καλλιέργειας, [-]
$K_{c\ ini}$	συντελεστής καλλιέργειας για το αρχικό στάδιο, [-]
$K_{c\ mid}$	συντελεστής καλλιέργειας για το στάδιο μέσης περιόδου, [-]
$K_{c\ end}$	συντελεστής καλλιέργειας για το τελικό στάδιο, [-]
$K_{c\ max}$	μέγιστη τιμή του φυτικού συντελεστή μετά από βροχή ή άρδευση, [-]
$K_{c\ min}$	ελάχιστη τιμή του φυτικού συντελεστή κάτω από ξηρό έδαφος χωρίς κάλυψη, [-]
K_{cb}	βασικός φυτικός συντελεστής, [-]
$K_{cb\ ini}$	βασικός φυτικός συντελεστής για το αρχικό στάδιο, [-]
$K_{cb\ mid}$	βασικός φυτικός συντελεστής για το μέσο στάδιο, [-]
$K_{cb\ end}$	βασικός φυτικός συντελεστής για το τελικό στάδιο, [-]
K_e	συντελεστής εξάτμισης του εδάφους, [-]
K_r	συντελεστής μείωσης της εξάτμισης του εδάφους, [-]
K_s	συντελεστής υδατικής καταπόνησης, [-]
L_{ini}	διάρκεια αρχικού σταδίου ανάπτυξης, [day]
L_{dev}	διάρκεια σταδίου ταχείας ανάπτυξης της καλλιέργειας, [day]
L_{mid}	διάρκεια μέσου σταδίου ανάπτυξης, [day]
L_{late}	διάρκεια τελικού σταδίου ανάπτυξης, [day]
LAI	δείκτης φυλλικής επιφάνειας, (leaf area index) [m^2 (φυλλικής επιφάνειας) m^{-2} (εδαφικής επιφάνειας)]
N	μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια κατά την διάρκεια της ημέρας όταν υπάρχει ολική αιθρία, [hours]
n	πραγματικές ώρες ηλιοφάνειας, [hours]
n/N	σχετική ηλιοφάνεια κατά την διάρκεια της ημέρας,
P	βροχοπτώση, [mm]
P_a	ατμοσφαιρική πίεση, [kPa]
R_a	εξωγήινη ακτινοβολία, [$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$]
R_l	ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, [$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$]
R_n	καθαρή ακτινοβολία, [$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$]

R_{nl}	καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
R_{ns}	καθαρή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
R_s	ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
R_{so}	ακτινοβολία ολικής αιθρίας, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
r_a	αεροδυναμική αντίσταση, [s m^{-1}]
r_s	πυκνότητα επιφάνειας ή αντίσταση καλυμμένης επιφάνειας, [s m^{-1}]
R_s/R_{so}	σχετική ακτινοβολία ή σχετική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος [-]
RAW	ωφέλιμη υγρασία, [mm]
REW	άμεσα εξατμιζόμενο νερό, μέγιστο ύψος νερού που μπορεί να εξατμισθεί από την επιφανειακή στρώση του εδάφους χωρίς περιορισμό κατά την διάρκεια του σταδίου, [mm]
RH	σχετική υγρασία, [%]
RH_{max}	μέγιστη ημερήσια σχετική υγρασία, [%]
RH_{mean}	μέση ημερήσια σχετική υγρασία, [%]
RH_{min}	ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία, [%]
RO	επιφανειακή απορροή, [mm]
T	θερμοκρασία αέρα, [$^{\circ}\text{C}$]
T_k	θερμοκρασία αέρα, [K]
T_{max}	μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα, [$^{\circ}\text{C}$]
T_{min}	ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα, [$^{\circ}\text{C}$]
TAW	διαθέσιμη εδαφική υγρασία, [mm]
TEW	συνολικά εξατμιζόμενο νερό, μέγιστο ύψος νερού που μπορεί να εξατμισθεί από την επιφανειακή στρώση του εδάφους χωρίς περιορισμό κατά την διάρκεια του σταδίου, [mm]
U_2	ταχύτητα του αέρα σε 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, [m s^{-1}]
WUE	αποτελεσματικότητα χρήσης νερού
WUE_{TOT}	συνολική αποτελεσματικότητα χρήσης νερού, [$\text{kg στρ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$]
WUE_{IRR}	αποτελεσματικότητα χρήσης αρδευτικού νερού, [$\text{kg στρ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$]
Y	παραγωγή της καλλιέργειας, [Kg στρ^{-1}]
Z_e	βάθος από την επιφάνεια της εδαφικής στρώσης εκτιθέμενο για ξήρανση με εξάτμιση, [m]
Z_r	βάθος ριζοστρώματος, [m]
z	υψόμετρο, ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, [m]

xxviii ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

a	συντελεστής ανάκλασης, (albedo) [-]
γ	ψυχομετρική σταθερά, [kPa °C ⁻¹]
Δ	κλίση της γραμμής πίεσης κορεσμού υδρατμών, [kPa °C ⁻¹]
ΔS	διαφορά της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας, [mm]
δ	κλίση του ηλίου, [rad]
θ	εδαφική υγρασία, [m ³ (νερού) m ⁻³ (εδάφους)]
θ_{FC}	εδαφική υγρασία στην ιδατοϊκανότητα, [m ³ (νερού) m ⁻³ (εδάφους)]
θ_t	όριο εδαφικής υγρασίας κάτω από το οποίο μειώνεται η διαπνοή λόγω ανεπάρκειας νερού, [m ³ (νερού) m ⁻³ (εδάφους)]
θ_{WP}	εδαφική υγρασία στο σημείο μόνιμης μάρανσης, [m ³ (νερού) m ⁻³ (εδάφους)]
λ	λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, [MJ Kg ⁻¹]
ρ_a	μέση πυκνότητα αέρα, [Kg m ⁻³]
ρ_b	φαινόμενη ξηρή πυκνότητα του εδάφους, [Kg m ⁻³]
σ	σταθερά Stefan – Boltzmann [4,903 10 ⁻⁹ MJ K ⁻⁴ m ⁻² day ⁻¹]
φ	γεωγραφικό πλάτος, [rad]
ω	χρονική ηλιακή γωνία στο μέσο της χρονικής περιόδου, [rad]
ω_s	γωνία της ώρας δύσης του ηλίου, [rad]

Εισαγωγή

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η αρδευόμενη γεωργία βρίσκεται και καλείται να λειτουργήσει ανάμεσα σε δύο αντικρουόμενες πραγματικότητες. Η μία πραγματικότητα είναι το γεγονός, ότι πρέπει να ικανοποιήσει τις ανάγκες διατροφής και τις αυξανόμενες προσδοκίες για πιο άνετη ζωή όλο και περισσότερων ατόμων. Η άλλη, είναι οι περιορισμοί που υπάρχουν στην εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και στη δυνατότητα απορρόφησης των περιβαλλοντικών στρεβλώσεων που δημιουργούνται από την εκμετάλλευσή τους. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού και δημιουργεί τη συνεχή ανάγκη για βελτίωση ή ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνικών εξοικονόμησης.

Με γνώμονα την αρχή της βελτιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα διαθέσιμου νερού, αντί αυτής της μεγιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα επιφανείας γης, που επικρατούσε, κυρίαρχο ζητούμενο στον τομέα των αρδεύσεων είναι η ανάπτυξη συστημάτων άρδευσης με υψηλή αποτελεσματικότητα και μεγάλες δυνατότητες για μείωση των απωλειών κατά την εφαρμογή του νερού.

Η προσπάθεια για την επίτευξη μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας κατά την εφαρμογή του νερού στις αρδεύσεις, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών και ποικίλων μεθόδων άρδευσης. Η στάγδην άρδευση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις σύγχρονες μεθόδους άρδευσης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού, τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υπόγεια εφαρμογή της.

Στη χώρα μας η αρδευόμενη με σταγόνα έκταση συμμετείχε με ποσοστό 22% στην συνολική αρδευόμενη γεωργική έκταση (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, 2000). Μολονότι η επιφανειακή στάγδην άρδευση έχει υιοθετηθεί από τους καλλιεργητές, η υπόγεια έχει τύχει εφαρμογής της σε ελάχιστο ποσοστό από αυτούς, παρ' όλο που τα πλεονεκτήματά της έχουν αποδειχθεί και από εγχώριες ερευνητικές μελέτες σε διάφορες καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων και των ζαχαροτεύτλων (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά., 2000, 2007β, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2001, 2002α,β).

Σχεδόν όλες οι γνωστές μέθοδοι άρδευσης καλλιέργειών χρησιμοποιούνται στα ζαχαρότευτλα ανά τον κόσμο. Σε κάθε περιοχή, η μέθοδος καθορίζεται πολύ περισσότερο από αυτό που είναι τεχνικά και οικονομικά δυνατό στα τοπικά πλαίσια παρά από τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτων. Έτσι, η επιφανειακές αρδεύσεις μέσω λεκανών, λωρίδων ή αυλάκων κυριαρχεί στις ΗΠΑ, την Τουρκία και το Ιράν, ενώ τα συστήματα καταιονισμού που χρησιμοποιούν αυτοκινούμενους εκτοξευτές, ράμπες, περιστροφικούς αρδευτές κ.λπ., χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις αρδευόμενες εκτάσεις ζαχαροτεύτων στην Ιταλία, τη Γαλλία, την Ελλάδα και τη βόρεια Ευρώπη. Στην Ισπανία, οι παραδοσιακές επιφανειακές μέθοδοι άρδευσης αντικαθίστανται από συστήματα καταιονισμού. Η επιλογή μεταξύ επιφανειακής και άρδευσης με καταιονισμό οδήγησε τους Haddock et al. (1974) να συγκρίνουν αυλάκια με εκτοξευτές. Αν και η άρδευση με εκτοξευτές έδωσε υψηλότερα φυτά με πιο πράσινες κορυφές από ότι η άρδευση με αυλάκια, δεν υπήρξε καμία διαφορά στη συγκέντρωση ζάχαρης στις ρίζες. Οι παραγωγές ζάχαρης ήταν ίσες, αλλά δεδομένου ότι στα αυλάκια χρησιμοποιήθηκε 20% περίπου περισσότερο νερό, είχαν μια αντίστοιχα χαμηλότερη παραγωγή ανά μονάδα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε.

Με τη βαθιά ριζοβολία του, το ζαχαρότευτλο μπορεί να δεχθεί άρδευση από κάτω, π.χ. από την ανύψωση της υπόγειας στάθμης, υπό τον όρο ότι η καλλιέργεια μπορεί να λάβει επαρκή θρεπτικά όταν το επιφανειακό στρώμα της εδαφικής κατατομής παραμένει ξηρό (Henderson et al., 1968, Benz et al., 1985). Η στάγδην άρδευση, χρησιμοποιείται κυρίως για τις μεγάλης αξίας καλλιέργειες που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην έλλειψη νερού. Πειράματα στην Αγγλία δεν έδειξαν συστηματική διαφορά της επίδρασης της στάγδην άρδευσης και του καταιονισμού (Draycott and Messem, 1977). Τις πολύ θερμές ημέρες, ακόμη και οι καλά αρδευόμενες καλλιέργειες ζαχαρότευτων μπορεί να δείξουν σημεία μάρανσης. Η άρδευση με υδρονέφωση μπορεί να αναχαιτίσει αυτήν την παροδική καταπόνηση, αλλά δεν έχει δείξει να δίδει αξιοσημείωτη αύξηση της παραγωγής (Kohl and Cary, 1969, Milford, 1975) και εν πάση περιπτώσει η τεχνική αυτή δεν είναι αποτελεσματική για τις καλλιέργειες αγρού.

Όλες οι μέθοδοι στοχεύουν στην ομοιόμορφη εφαρμογή προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαθεσιμότητα του νερού σε όλη την καλλιέργεια και να αποφευχθεί η σπατάλη νερού με την βαθιά διήθηση ως αποτέλεσμα της υπεράρδευσης. Εντούτοις, επειδή το ζαχαρότευτλο δεν παρουσιάζει κανένα ευαίσθητο στάδιο και επειδή η

ποιότητά του δεν επηρεάζεται δραστικά από μέτρια υδατική καταπόνηση, επηρεάζεται λιγότερο από τη φτωχή ομοιομορφία σε σχέση με άλλες καλλιέργειες. Οι Ayars et al. (1990) βρήκαν για το ζαχαρότευτλο ότι μεγάλες παραλλακτικότητες δεν είχαν καμία επίδραση, ενώ μικρότερες παραλλακτικότητες επαναλαμβανόμενες, είχαν επιπτώσεις στην παραγωγή ζάχαρης και στην αποδοτικότητα χρήσης του νερού. Γενικά, οι επιφανειακές μέθοδοι παρουσιάζουν την μικρότερη και η άρδευση με σταγόνες την μεγαλύτερη ομοιομορφία.

Η στάγδην άρδευση είναι ακόμα υπό έρευνα, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνεται να είναι ενθαρρυντικά, τόσο όσον αφορά την παραγωγή αλλά και σε σχέση με την ομοιομορφία άρδευσης, την εξοικονόμηση νερού και την επίδραση στο μικροκλίμα της καλλιέργειας (συνθήκες για ανάπτυξη ζιζανίων και ασθενειών).

Οι Sharmasarkar et al. (2001), αναφέρουν υψηλότερη παραγωγή ριζών ζαχαρότευτλων και στρεμματοζαχάρου (το γινόμενο του νωπού βάρους ριζών και της περιεκτικότητας σε ζάχαρη ανά στρέμμα) κάτω από συνθήκες στάγδην άρδευσης συγκριτικά με την άρδευση με αυλάκια και η υψηλότερη αποδοτικότητα παρουσιάζεται στις περιοχές με μεγαλύτερο κόστος νερού και υψηλότερες δαπάνες για καταπολέμηση ζιζανίων.

Επίσης, σε πείραμα που διεξήχθη στην περιοχή Wyoming των Η.Π.Α., οι παραπάνω ερευνητές αναφέρουν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού και λιπάσματος ήταν υψηλότερη στην στάγδην άρδευση από ότι στην άρδευση με κατάκλυση, δίνοντας παράλληλα και υψηλότερη παραγωγή στρεμματοζαχάρου κατά 3-28% ακόμα και στις περιπτώσεις μειωμένης εφαρμογής νερού με το σύστημα της στάγδην άρδευσης.

Οι Hanson and Kaffka (2002) αναφέρουν ότι στην Καλιφόρνια η στάγδην άρδευση χρησιμοποιείται κυρίως σε καλλιέργειες κηπευτικών και σε οπωρώνες και ότι στην περίπτωση των ζαχαροτευτλων η εφαρμογή της μεθόδου βρίσκεται σε αρχικό στάδιο. Οι ίδιοι ερευνητές σημειώνουν πως η στάγδην μπορεί να παίξει ρόλο στην μείωση των απωλειών της καλλιέργειας λόγω της ριζομανίας.

Οι Tognetti et al. (2003), αναφέρουν εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 25% με εφαρμογή στάγδην άρδευσης σε πείραμα που διεξήχθη στην νότια Ιταλία, συγκριτικά με την χαμηλής πίεσης τεχνητή βροχή, χωρίς σημαντικές διαφορές στην παραγωγή της καλλιέργειας ζαχαρότευτλων.

Στην χώρα μας, το ποσοστό των καλλιεργουμένων με ζαχαρότευτλα εκτάσεων που αρδεύονται με στάγδην άρδευση φθάνει μόλις το 8% όπως φαίνεται στον Πίνακα

4 ΓΕΝΙΚΑ

1.1 όπου παρουσιάζονται οι μέθοδοι άρδευσης που εφαρμόζονται στην τευτλοκαλλιέργεια στην χώρα μας και το ποσοστό επί της συνολικής έκτασης που καλύπτει η καθεμία από αυτές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1. Μέθοδοι άρδευσης των ζαχαροτεύτλων στην Ελλάδα και ποσοστιαία αναλογία αυτών επί της καλλιεργούμενης έκτασης

Μέθοδος άρδευσης	Ποσοστό καλλιεργούμενης έκτασης (%)
Άρδευτής με αυτοκινούμενο εκτοξευτή (κανόνι)	47
Άρδευτής με αυτοκινούμενο ιστό (ράμπα)	35
Στάγδην	8
Εκτοξευτές χαμηλής και μέσης πίεσης	5
Επιφανειακές αρδεύσεις	4
Μικροεκτοξευτές	1

Πηγή: Ε.Β.Ζ. (Αδημοσίευτα στοιχεία)

Στην Ελλάδα, εκτός από την έρευνα που διεξάγει η Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, για την επίδραση της στάγδην άρδευσης στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας ζαχαρότευτλων, έχουν ασχοληθεί και οι Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά. (1998, 1999, 2000), Ντιούδης κ.ά. (2003) και οι Σακελλαρίου και Δημοπούλου (2005α,β) μελετώντας διαφορετικές διατάξεις σταλακτηφόρων αγωγών, δόσεις και συχνότητες άρδευσης.

Έχει επίσης αξιολογηθεί η επιφανειακή και η υπόγεια στάγδην άρδευση σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων (Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.ά., 2000, 2007β), όπου διαπιστώθηκε αύξηση του βάρους των ριζών και του ζαχαρικού τίτλου, καθώς και υψηλότερες τιμές υγρασίας σε μεγαλύτερα βάθη του εδάφους κάτω από συνθήκες υπόγεια στάγδην άρδευσης. Ακόμα αναφέρεται, η δυνατότητα εξοικονόμησης νερού κατά 20% κάτω από συνθήκες υπόγεια στάγδην άρδευσης, χωρίς να υπάρχει ουσιαστική μείωση στην παραγωγή ζαχαρότευτλων (Sakellariou – Makrantonaki et al., 2001, 2002a,b).

Για να αυξηθεί η συμβολή της άρδευσης στην παραγωγή τροφίμων, ο FAO (2002) δηλώνει ότι «αυτό που απαιτείται είναι βελτιωμένη αποδοτικότητα στη χρήση του νερού άρδευσης. Δεδομένου ότι η δυνατότητα διάθεσης περισσότερου νερού για την άρδευση είναι ένα απίθανο σενάριο, υπάρχει μια επείγουσα ανάγκη να βελτιωθεί η άρδευση και η αποδοτικότητα χρήσης νερού των συμβατικών πρακτικών άρδευσης προκειμένου να στηριχτούν η γεωργία και η παραγωγή τροφίμων».

Σημαντικότερη πρόοδος έχει γίνει στην ανάπτυξη της αρδευτικής τεχνολογίας από τη δεκαετία του '70. Το βασικό κίνητρο για έρευνα στην άρδευση αποτέλεσε η απαίτηση των καλλιεργητών για τεχνολογίες άρδευσης που μειώνουν τις εισροές νερού και εργασίας. Η μετάβαση από τις επιφανειακές μεθόδους στην άρδευση με σωλήνες, που ακολουθήθηκε από μια μετάβαση από τη χρήση των εκτοξευτών στην στάγδην άρδευση, έχει πραγματοποιηθεί μετά από εντατική έρευνα στους τομείς της γεωργίας και της μηχανικής των τεχνολογιών άρδευσης (Kruse et al., 1990).

Η άρδευση καταναλώνει το μεγαλύτερο μερίδιο του διαθέσιμου νερού. Με την αυξανόμενη ανησυχία κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών για τη χρήση νερού στην άρδευση, υπάρχει μια ανάγκη να βελτιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της αρδευόμενης γεωργίας (Schultz and Wrachien, 2002). Έτσι, πολλές ουσιαστικές ερευνητικές εργασίες εκτελούνται και αρκετές μελέτες έχουν δημοσιευθεί για την εξοικονόμηση νερού άρδευσης, την στράγγιση και την απορροή που σχετίζονται με τα διάφορα αρδευτικά συστήματα (Framji et al., 1982, Bucks et al., 1982, Higgins et al., 1987, Jensen et al., 1990).

Η αρδευόμενη γεωργία συμβάλλει κατά 40% στην παγκόσμια παραγωγή τροφίμων. Οι επιφανειακές μέθοδοι κατά κύριο λόγο και ο καταιονισμός είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι άρδευσης ανά τον κόσμο. Εντούτοις, η αποδοτικότητα – εκφρασμένη ως αναλογία της χρήσης νερού προς το εφαρμοσμένο νερό άρδευσης - αυτών των μεθόδων είναι φτωχή (Raine and Foley, 2002). Το αυξανόμενο κόστος του νερού, η δημόσια πίεση για μεγαλύτερο έλεγχο των περιβαλλοντικών στρεβλώσεων, η αυξανόμενη αστική χρήση και η μειωμένη διαθεσιμότητα υπόγειου νερού, έχουν οδηγήσει σε μια τάση για μειωμένη παροχέτευση προς τη γεωργία, που αναγκάζει τους καλλιεργητές να ψάξουν τις εναλλακτικές λύσεις που βελτιώνουν την αποδοτικότητα της χρήσης νερού. Με δεδομένη την αυξανόμενη τάση περιορισμού του νερού άρδευσης, συστήματα με φτωχή αποδοτικότητα δεν θα είναι σε θέση να παραγάγουν επαρκής ποσότητες τροφίμων για τον πληθυσμό των εννέα δισεκατομμυρίων όπως αναμένεται να φθάσει στα μέσα αυτού του αιώνα (Davis and Hirji, 2003).

Ως εκ τούτου, η χρήση σύγχρονων και καινοτόμων τεχνολογιών για να αυξηθεί η αποδοτικότητα της χρήσης νερού είναι επιτακτικός. Η Υπόγεια Στάγδην Άρδευση (ΥΣΑ) χρησιμοποιεί σημαντικά λιγότερο νερό από την άρδευση με αυλάκια μέσω της ελαχιστοποίησης της στράγγισης, της απορροής και των χαμηλότερων απωλειών από εξάτμιση (Alam and Broner, 2001). Επομένως, η ΥΣΑ προσφέρει τεράστιο πεδίο για την

6 ΓΕΝΙΚΑ

αύξηση τόσο της αρδευόμενης έκτασης όσο και της παραγωγής, χωρίς αυξημένη χρήση νερού (Xie et al., 1993, Lamm et al., 1995b). Η ΥΣΑ προσφέρει τη μεγαλύτερη ακρίβεια της εφαρμογής νερού άρδευσης όσον αφορά τη θέση και επίσης στον προγραμματισμό της άρδευσης. Έτσι, προσφέρει στους καλλιεργητές τη δυνατότητα για αύξηση του οικονομικού οφέλους λόγω της μείωσης στο νερό, το λίπασμα, τις δαπάνες καλλιέργειας και την αύξηση στην παραγωγή (Hanson et al., 2002).

Η ΥΣΑ δεν είναι μια μακροχρόνια καθιερωμένη πρακτική άρδευσης. Η καταγραμμένη εμπειρία των καλλιεργητών είναι ισχνή. Πολλά από τα πρώτα συστήματα ΥΣΑ δυσλειτούργησαν λόγω της φτωχής διαχείρισής τους, των προβλημάτων από εισχώρηση ριζών στους σταλάκτες και του ακατάλληλου σχεδιασμού. Εντούτοις, υπάρχουν εγκαταστάσεις ΥΣΑ από τις οποίες έχει συσσωρευθεί αρκετή εμπειρία κατά τη διάρκεια του χρόνου (Ayars et al., 1999). Παρά την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας ΥΣΑ και τα πολλά πιθανά οφέλη, η υιοθέτηση της μεθόδου είναι ακόμα αργή.

Η ΥΣΑ χρησιμοποιείται σε μεγάλες καλλιέργειες, δένδρα, αμπέλια καθώς και καλλωπιστικά φυτά και χλοοτάπητες. Στην ανασκόπηση δημοσιευμένων αποτελεσμάτων έρευνας στην ΥΣΑ καταγράφησαν πάνω από 30 διαφορετικές καλλιέργειες. Οι περισσότερες εφαρμογές ήταν σε βιομηχανικά φυτά και εδώδιμες καλλιέργειες, αλλά κάποιες εφαρμογές περιελάμβαναν χλοοτάπητες και φυτά πρασίνου, ειδικότερα από πηγές ανακυκλωμένου νερού. Στις γραμμικές καλλιέργειες, το βαμβάκι και το καλαμπόκι ήταν οι συχνότερα αναφερόμενες ενώ πολλές αναφορές περιελάμβαναν την μηδική, ενώ φαίνεται πως η υπόγεια στάγδην άρδευση δεν έχει τύχει εφαρμογής στα ζαχαρότευτλα.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι αποδόσεις με την χρήση της υπόγειας στάγδην άρδευσης διαπιστώνεται ότι είναι ίσες ή καλύτερες με τις αποδόσεις που προκύπτουν με την χρήση άλλων συστημάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη διαθεσιμότητα και το αυξανόμενο κόστος του νερού, η υιοθέτηση της υπόγειας στάγδην άρδευσης είναι μια κατάλληλη επιλογή για βιώσιμη αρδευόμενη γεωργία.

1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο σκοπός για τον οποίον εκπονήθηκε η παρούσα διδακτορική διατριβή, θα γίνει περισσότερο κατανοητός, εάν προηγουμένως αναφερθούν οι λόγοι και τα ερωτηματικά που οδήγησαν στην εκπόνησή της:

A. Η εξατμισοδιαπνοή (ET) αντιπροσωπεύει τη χρήση αρδευτικού νερού και βροχοπτώσεων από τις καλλιέργειες. Η διαπνοή (T) είναι το βασικό συνθετικό της ET που επιδρά στην σχέση ET-παραγωγής. Ωστόσο, η εξάτμιση (E) κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου είναι ένα σημαντικό μέρος της εξατμισοδιαπνοής.

Κατά την εκτίμηση των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι πρακτικές διαχείρισης που επιδρούν στους κλιματικούς και φυτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της ET. Οι καλλιεργητικές πρακτικές και η μέθοδος άρδευσης μπορεί να μεταβάλλουν το μικροκλίμα, να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ή την ύγρανση του εδάφους και του φυλλώματος των φυτών (Allen et al., 1998). Η εξάτμιση μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα ορθά σχεδιασμένο σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης. Οι σταλάκτες εφαρμόζουν το νερό κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αφήνοντας ένα μεγάλο μέρος της εδαφικής επιφάνειας ξηρό και περιορίζοντας έτσι τις απώλειες λόγω εξάτμισης.

Ενώ είναι απολύτως αναγνωρισμένες οι απώλειες λόγω εξάτμισης στην εφαρμογή της άρδευσης, δεν είναι το ίδιο βεβαιωμένες οι τιμές της. Από την ανασκόπηση δημοσιευμένων πληροφοριών (Camp, 1998) προκύπτει ότι η εξάτμιση μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό από 5% έως 25% της εξατμισοδιαπνοής, ένα πραγματικά μεγάλο εύρος. Έτσι γεννάται το ερώτημα: ακόμα και αν είναι γνωστό το μέγεθος της εξάτμισης, τι μπορεί να κάνει ο σχεδιασμός και η διαχείριση των αρδεύσεων γι' αυτό; Αυτό το ερώτημα μπορεί να απαντηθεί με τη γνώση του πότε και πώς η εξάτμιση εμφανίζεται καθώς και με τη γνώση της ακριβούς τιμής της. Αν η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη από όσο θεωρείται, αυτή η γνώση μπορεί να αποτελέσει το κριτήριο εφαρμογής διαφόρων μέτρων μείωσής της, τα οποία έως τώρα δεν χρησιμοποιούνται θεωρούμενα ως υψηλού κόστους. Από την άλλη πλευρά, αν η εξάτμιση είναι πολύ λιγότερη από όσο θεωρείται, μπορεί να φανεί πως υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα εξοικονόμησης νερού και έτσι επενδύσεις για μείωση της εξάτμισης (όπως είναι η επένδυση στην ΥΣΑ) θα ήταν ανώφελη ή ζημιογόνος. Αλλά χωρίς αυτή τη γνώση, δεν υπάρχει βάση για δράση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Έτσι προκύπτουν δύο ερωτήματα: είναι η εξάτμιση σημαντική; Αξίζει η εφαρμογή τεχνολογιών και πρακτικών που μπορούν να την μειώσουν; Η διατριβή αυτή απαντά στο πρώτο ερώτημα και δίδει μια μερική λύση στο δεύτερο.

Στην διατριβή μελετώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση και **το σχετικό ποσοστό της στην συνολική εξατμισοδιαπνοή** χρησιμοποιώντας την μέθοδο FAO-56 για τον υπολογισμό της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό καθίσταται ιδιαίτερος χρήσιμο για μελέτες που επιδιώκουν την βελτιστοποίηση της απόδοσης της καλλιέργειας μειώνοντας το κλάσμα της ΕΤ που οφείλεται στην εξάτμιση από το έδαφος.

Β. Κατά την εφαρμογή της άρδευσης, η κίνηση του νερού προκαλείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις, οι οποίες έχουν την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις, καθώς επίσης και από την δύναμη της βαρύτητας, η οποία είναι συνεχής και με κατεύθυνση προς τα κάτω. Οι τριχοειδείς δυνάμεις ελαττώνονται, καθώς η υγρασία του εδάφους αυξάνεται. Επομένως σε ξηρό έδαφος οι τριχοειδείς δυνάμεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από ότι η δύναμη της βαρύτητας και ωθούν το νερό εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς το έδαφος υγραίνεται, οι πόροι του καθίστανται κορεσμένοι και οι τριχοειδείς δυνάμεις εξασθενούν επιτρέποντας στην δύναμη της βαρύτητας να επικρατήσει. Κατά συνέπεια η κίνηση του νερού καθίσταται κυρίως κατακόρυφη (Phene, 1995a, Oron, 1981). Η απλή και βασική αυτή αρχή υποδηλώνει ότι το αρδευτικό νερό πρέπει να εφαρμόζεται σε συχνές και μικρές δόσεις, ούτως ώστε η κίνηση του νερού στο έδαφος να καθορίζεται κυρίως από την δράση των τριχοειδών δυνάμεων.

Αυτή η θεώρηση οδήγησε στην υπόθεση ότι όταν εφαρμοσθεί νερό με ΥΣΑ αλλά και με ΕΣΑ, με μικρές εντάσεις βροχής, μπορεί να διαμορφωθεί ένα υγρασιακό περιβάλλον στο ριζόστρωμα που να ευνοεί την καλύτερη ανάπτυξη και μεγαλύτερη απόδοση της καλλιέργειας. Αυτό προτείνεται στην παρούσα έρευνα να επιτευχθεί με την τεχνική της **διακοπτόμενης** εφαρμογής του νερού καθώς και με την εφαρμογή του νερού μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης με **βαρύτητα**.

Διάφορες τεχνικές διακοπτόμενης εφαρμογής του νερού έχουν τύχει εφαρμογής στις επιφανειακές μεθόδους άρδευσης (surge irrigation) (James, 1988) και σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες (pulse irrigation)(Beeson and Haydu, 1995). **Η διακοπτόμενη άρδευση δεν έχει εφαρμοσθεί έως τώρα σε συστήματα στάγδην σε συνθήκες αγρού.**

Η άρδευση με χαμηλή παροχή μέσω συστήματος με βαρύτητα έχει κάποιες

εφαρμογές, κυρίως πρακτικές και όχι ερευνητικές, από εταιρίες που αναπτύσσουν εμπορική δραστηριότητα σε τρίτες χώρες για άρδευση, κυρίως λαχανόκηπων, και όπου δεν υπάρχει η οικονομική δυνατότητα αγοράς εξοπλισμού για συστήματα με πίεση ή όπου η εγκατάσταση συστημάτων υπό πίεση είναι παρακινδυνευμένη κυρίως λόγω κλοπής. Δεν έχει γίνει περαιτέρω έρευνα επάνω στο αντικείμενο αυτό.

Γ. Η ΥΣΑ ως μια πηγή που παρέχει το νερό απευθείας στο ριζόστρωμα αναπτύσσει ένα κορεσμένο υγρό μέτωπο στην ριζόσφαιρα, ειδικότερα όταν η δόση άρδευσης είναι κοντά το 100% της εξατμισοδιαπνοής ή και χαμηλότερη (Machado et al., 2003). Μεγάλης διάρκειας αρδεύσεις συγκεντρώνουν την ανάπτυξη των ριζών γύρω από τους σταλάκτες και η σχετικά χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, στα βαρεία κυρίως εδάφη, οδηγούν σε διατήρηση του κορεσμού στο ριζόστρωμα επιφέροντας έλλειψη αέρα, η οποία είναι επιζήμια για την λειτουργία των ριζών και επιδρά άμεσα στην ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Οι Meek et al. (1983) αναφέρουν ότι σε καλλιέργεια τομάτας αρδευόμενης καθημερινά με δόσεις 100-120% της εξατμισοδιαπνοής σε αργιλώδες έδαφος, μειώθηκε η συγκέντρωση οξυγόνου κάτω από την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή του και συμπέραναν ότι η συνεχής διατάραξη των συνθηκών αερισμού στο έδαφος πέραν του βάθους των 20 cm είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση της καλλιέργειας. Οι Goorahoo et al. (2001) επιβεβαίωσαν ότι καλλιέργειες αρδευόμενες με ΥΣΑ υπόκεινται σε έλλειψη οξυγόνου στο ριζόστρωμά τους και πρότειναν την παροχή αέρα σε καλλιέργεια πιπεριάς.

Θεωρητικές και πειραματικές προσεγγίσεις (Letey, 1961, Herr and Jarrel, 1980, Everard, 1985), καθώς και η χρήση μοντέλων (Meek et al., 1981, Biernbaum, 1992) υποδεικνύουν ότι ο αερισμός του ριζοστρώματος βελτιώνει την απόδοση των καλλιεργειών τόσο σε υδροπονικά συστήματα όσο και στο έδαφος.

Η βασική υποδομή της ΥΣΑ επιτρέπει την εύκολη σύνδεση συστημάτων παροχής αέρα στην γραμμή άρδευσης και έτσι την απευθείας παροχή αέρα στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών.

Γίνεται η υπόθεση ότι ο αερισμός του ριζοστρώματος βελτιώνει την απόδοση των φυτών μέσω της βελτίωσης της λειτουργίας και της ανάπτυξης των ριζών, ειδικότερα σε βαρεία εδάφη. Η ιδέα του αερισμού του εδάφους κατά τους Daigger (1979) και Busscher (1982) ανήκει πιθανότατα στον M. Enyeart και τα πρώτα πειράματα διεξήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στα

10 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν αεροσυμπιεστής και διάτρητοι σωλήνες τοποθετημένοι σε κάποιο βάθος σε αγρό και σε φυτοδοχεία.

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι ο αερισμός του ριζοστρώματος καλλιεργειών αύξησε την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών (Goorahoo et al., 2001, Heuberger et al., 2001, Bhattarai et al., 2004).

Με βάση τα προηγούμενα, στην παρούσα έρευνα προτείνεται μια **τεχνική αερισμού του ριζοστρώματος** που περιλαμβάνει την έγχυση αέρα στο αρδευτικό νερό καθ' όλη τη διάρκεια της άρδευσης και την παροχή αέρα με πίεση μετά την άρδευση.

Για την διερεύνηση αυτών των υποθέσεων, εκτελέσθηκε πειραματική έρευνα, τριετούς διάρκειας, σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων, σε αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όπου εγκαταστάθηκαν συστήματα υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι:

- Η αξιολόγηση της εξοικονόμησης αρδευτικού νερού με τη χρήση της υπόγειας σε σχέση με την επιφανειακή στάγδην άρδευση,
- Η επίδραση διαφορετικών τεχνικών εφαρμογής του νερού στην ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων.

Ειδικότεροι στόχοι της μελέτης είναι:

- Η σύγκριση της υπόγειας με την επιφανειακή στάγδην άρδευση με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού στα ζαχαρότευτλα,
- Η ανάπτυξη μιας διαδικασίας υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου άρδευσης,
- Η ανάπτυξη τεχνικών διαχείρισης της υγρασίας στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών, με τη χρήση διακοπτόμενης άρδευσης, άρδευσης με χαμηλή πίεση δια της βαρύτητας και με την έγχυση αέρα στο δίκτυο άρδευσης,
- Η διερεύνηση της πιθανότητας βελτίωσης της ποσοτικής και ποιοτικής απόδοσης της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων με τη χρήση αυτών των τεχνικών.
- Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της παραγωγικότητας της καλλιέργειας, κλιματικών δεδομένων και αρδευτικού νερού.

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η διατριβή αποτελείται από εννέα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται μια γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο σκοπός και η δομή της διατριβής καθώς και η συμβολή της εργασίας στην έρευνα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιευμένων αποτελεσμάτων της έρευνας στην εφαρμογή της υπόγειας στάγδην άρδευσης και στα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η σχεδίαση του πειράματος, ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος και οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη μετρήσεων κατά την πειραματική διαδικασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και του προγραμματισμού των αρδεύσεων.

Η αξιολόγηση της χρήσης της ΥΣΑ σε σχέση με την ΕΣΑ όσον αφορά στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού δίδεται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Η επίδραση των τεχνικών που εφαρμόστηκαν στην ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας συζητούνται στο έκτο κεφάλαιο.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η επίδραση των διαφορετικών τεχνικών εφαρμογής του νερού στην εδαφική υγρασία.

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ της παραγωγικότητας της καλλιέργειας και θερμοκρασίας αέρα, ηλιακής ακτινοβολίας και του αρδευτικού νερού.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την επεξεργασία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας και παρουσιάζονται προτάσεις επέκτασης της έρευνας.

Ακολουθεί ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών.

Στο Παράρτημα δίδεται η μεθοδολογία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

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

1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κύρια συμβολή της διατριβής αυτής στην περιοχή της έρευνας που καλύπτει και τα πρωτότυπα σημεία, τα οποία παρουσιάζει, είναι τα εξής:

- Εφαρμόζεται για πρώτη φορά άρδευση στα ζαχαρότευτλα με διακοπτόμενη εφαρμογή, με χαμηλή πίεση και με έγχυση αέρα,
- Εφαρμόζεται η μεθοδολογία FAO 56 στον υπολογισμό των αναγκών σε νερό στην υπόγεια στάγδην άρδευση που δεν έχει εφαρμοσθεί έως τώρα. Έτσι, υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας λαμβάνοντας υπόψη την εξάτμιση από το επιφανειακό έδαφος, συνθήκη η οποία διαφοροποιεί το αποτέλεσμα της εφαρμογής του νερού μέσω της υπόγειας στάγδην σε σχέση με την επιφανειακή,
- Αποδεικνύεται η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού στην άρδευση ζαχαροτεύτλων με τη χρήση της ΥΣΑ υπολογίζοντας την δόση άρδευσης από τα δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής,
- Εφαρμόζεται η τεχνική της διακοπτόμενης εφαρμογής του νερού, σε καλλιέργεια υπαίθρου, τόσο με τη χρήση ΥΣΑ όσο και με επιφανειακή σταγόνα,
- Εφαρμόζεται η τεχνική της εφαρμογής νερού με χαμηλή παροχή μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης με βαρύτητα,
- Εφαρμόζεται η τεχνική έγχυσης αέρα στο νερό άρδευσης μέσω του συστήματος υπόγειας άρδευσης, σε βάθος > 15 cm σε καλλιέργεια αγρού.
- Περιγράφεται η ανάπτυξη της διαμέτρου διαβροχής με το χρόνο στην επιφανειακή διακοπτόμενη άρδευση, με γραμμική εξίσωση εν αντιθέσει με την εκθετική που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της στη συμβατική άρδευση με σταγόνα,
- Από πειραματικές διαδικασίες καταδεικνύεται ότι η διακοπτόμενη άρδευση (επιφανειακή και υπόγεια) μπορεί να εξασφαλίσει μεγαλύτερη επιφάνεια πρόσληψης νερού από τα φυτά, καλύτερη χωρική κατανομή της εδαφικής υγρασίας και αποφυγή απωλειών λόγω βαθείας διήθησης,
- Αναδεικνύεται η δυνατότητα διαμόρφωσης καλύτερης κατανομής της υγρασίας σε σύγκριση με τη συμβατική άρδευση με σταγόνα διοχετεύοντας αέρα στο νερό άρδευσης,
- Αποδεικνύεται πως η κατανομή του νερού στο έδαφος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος αφού η επίτευξη υψηλής ομοιομορφίας παροχής του νερού από το σύστημα και μόνον δεν παρέχει την επιθυμητή κατανομή της υγρασίας.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, διενεργήθηκε μια ανασκόπηση δημοσιευμένων εργασιών για την υπόγεια στάγδην άρδευση (ΥΣΑ) καθώς επίσης και μια ανασκόπηση εργασιών που παρέχουν πληροφορίες για την καλλιέργεια των ζαχαροτεύλων και κυρίως για την επίδραση της άρδευσης στα παραγωγικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

Οι δημοσιευμένες εργασίες για την ΥΣΑ ποικίλουν ευρέως σε περιεχόμενο και σκοπό, ιδίως σε σχέση με την απόδοση των καλλιεργειών, τις παραμέτρους τους συστήματος, τις μετρήσεις φυτών και εδάφους. Στις εργασίες συζητούνται αρκετές τεχνικές προγραμματισμού και στρατηγικές διαχείρισης, ζητήματα αναγκών σε νερό των καλλιεργειών και αποδοτικότητας χρήσης νερού. Τέλος, περιλαμβάνουν, ζητήματα μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας και εκτίμησης της ομοιομορφίας καθώς και εκτιμήσεις της μακροβιότητας των συστημάτων.

Τα παραγωγικά αποτελέσματα για πάνω από 30 καλλιέργειες δείχνουν πως η απόδοση τους με την υπόγεια σταγόνα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν μεγαλύτερη ή ίση προς αυτή που επιτεύχθηκε με άλλες αρδευτικές μεθόδους, περιλαμβανομένης της επιφανειακής στάγδην. Πληροφορίες σχετικά με τη χρήση ΥΣΑ στην άρδευση ζαχαροτεύλων, δεν ανακτήθηκαν άλλες πέραν των δημοσιευμένων εργασιών του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής.

Η ανασκόπηση περιλαμβάνει δημοσιευμένες εργασίες ειδικά για την ΥΣΑ. Εντούτοις, ένα μεγάλο μέρος των δημοσιευμένων πληροφοριών που αναφέρονται στην επιφανειακή στάγδην άρδευση γενικά ισχύουν και για την ΥΣΑ. Έμφαση δόθηκε κυρίως στη βιβλιογραφία από επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων που εξέθεταν τα αποτελέσματα επαναλαμβανόμενων μελετών. Συμπεριλήφθηκαν όμως και άλλες πηγές βιβλιογραφίας για να βοηθήσουν στην ιστορική ανασκόπηση ή για να ανακτηθούν σημαντικές πληροφορίες, άλλως όχι διαθέσιμες.

2.2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ (ΥΣΑ)

Το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης αποτελεί μία παραλλαγή του ευρέως διαδεδομένου επιφανειακού συστήματος άρδευσης με σταγόνες (ΕΣΑ), στο οποίο οι αγωγοί εφαρμογής τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αντί να τοποθετούνται επιφανειακά. Λόγω της υπόγειας τοποθέτησης των αγωγών, το νερό της άρδευσης, τα θρεπτικά συστατικά, καθώς και άλλα εκχεόμενα χημικά, παροχετεύονται απ' ευθείας στο ριζόστρωμα των φυτών. Συνεπώς, επιτυγχάνεται η ακριβής εφαρμογή τους. Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν - όπως καταγράφεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί - ότι το γεγονός αυτό επιτρέπει την βελτιστοποίηση της παραγωγής και οδηγεί σε συγκομιδή, υψηλότερης ποσοτικής και ποιοτικής απόδοσης.

2.2.1. ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΥΣΑ

Ένα ορθώς διαχειριζόμενο σύστημα ΥΣΑ μπορεί να αυξήσει τα πλεονεκτήματα της στάγδην άρδευσης, ειδικά σε περιοχές όπου η εξοικονόμηση νερού είναι κυρίαρχο ζήτημα. Τρία φυσικά χαρακτηριστικά της ΥΣΑ ενισχύουν τα πλεονεκτήματά της:

1. Σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο, τοποθετημένο και διαχειριζόμενο σύστημα ΥΣΑ, σχεδόν μηδενίζεται η εξάτμιση του νερού από την εδαφική επιφάνεια και μειώνεται σημαντικά η υγρασία του φυλλώματος (Grattan et al., 1990, Scherm and van Bruggen, 1995, Zoldoske and Norum, 1997).
2. Ένα από τα φυσικά χαρακτηριστικά στα οποία η ΥΣΑ πλεονεκτεί έναντι της ΕΣΑ είναι ο διαβρεχόμενος όγκος εδάφους. Ο Phene et al. (1987), οι Ben-Asher and Phene (1993) και ο Phene (1995b) αναφέρουν στα αποτελέσματα ερευνητικών τους εργασιών ότι υπάρχει μια αύξηση στον διαβρεχόμενο εδαφικό όγκο στην ΥΣΑ και στην διαθέσιμη επιφάνεια για πολλαπλασιασμό των ριζών και πρόσληψη του νερού. Υπολόγισαν ότι για δεδομένη παροχή νερού, ο σφαιρικός όγκος σε ένα αργιλοπηλώδες έδαφος είναι περίπου 46% μεγαλύτερος για ένα σύστημα ΥΣΑ σε σχέση με τον ημισφαιρικό όγκο που διαβρέχεται με ένα σύστημα επιφανειακής στάγδην.
3. Στην ΥΣΑ οι καλλιέργειες αναπτύσσουν βαθύτερο ριζικό σύστημα από ότι στην ΕΣΑ και έτσι οι ρίζες των φυτών συνήθως λειτουργούν υπό ένα περιβάλλον με μικρότερη διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας (ψυχρότερο το καλοκαίρι και θερμότερο τον χειμώνα). Εξαιτίας αυτού, η διαπνοή των φυτών που αρδεύονται από ένα σύστημα ΥΣΑ είναι χαμηλότερη από αυτή των φυτών που αρδεύονται με ΕΣΑ, γεγονός που οποίο συντελεί σε μια σημαντική αύξηση στην καθαρή φωτοσύνθεση (Phene et al., 1989).

2.2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ένα σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης, εφ' όσον αυτό τύχει ορθού σχεδιασμού και διαχείρισης, βρίθει πλεονεκτημάτων εν σχέσει με τα συμβατικά συστήματα, όπως απορρέουν από πληθώρα εργασιών που καταγράφονται στην ανασκόπηση:

- Ελαχιστοποιεί τις απώλειες νερού, λόγω εξάτμισης ή απορροής,
- Από την στιγμή που το σύστημα είναι υπόγειο, η απόδοση του συστήματος είναι ανεπηρέαστη από τα χαρακτηριστικά διήθησης της εδαφικής επιφάνειας,
- Η μόνιμη τοποθέτηση των αγωγών κάτω από το βάθος άρδωσης παρέχει σημαντική εξοικονόμηση εργατικών και συντελεί στην εξάλειψη των μηχανικών φθορών των αγωγών,
- Είναι δυνατή η προσέγγιση μηχανημάτων και η εργασία στον χώρο ακόμη και κατά την διάρκεια της άρδευσης,
- Προσφέρεται για άρδευση σε απόκρημνα, επικλινή αγροτεμάχια,
- Μειώνει την εμφάνιση ζιζανίων, λόγω της περιορισμένης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους. Επομένως μειώνει και την ανάγκη εφαρμογής ζιζανιοκτόνων,
- Συντελεί στην μείωση των ασθενειών, οι οποίες οφείλονται στον συνδυασμό υψηλής θερμοκρασίας και επιφανειακού νερού και συνεπώς στη μείωση της ανάγκης επιφανειακής χημικής καταπολέμησης,
- Προσφέρει δυνατότητα υπόγειας λίπανσης εξαλείφοντας την επαφή του ανθρώπου με χημικά προϊόντα. Η απευθείας εφαρμογή των λιπασμάτων στο ριζόστρωμα αποτελεί ειδικότερο πλεονέκτημα για στοιχεία με χαμηλή κινητικότητα στο έδαφος,
- Δίδει την δυνατότητα διατήρησης νερού, όντας ικανό να χρησιμοποιεί ανακυκλωμένο νερό για άρδευση και μειώνει τους κινδύνους από πιθανή έκθεση σε αυτό.

2.2.3. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ωστόσο, το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης δεν στερείται μειονεκτημάτων. Κάποια από τα μείζονα μειονεκτήματα, τα οποία ενδέχεται να αντιμετωπισθούν, είναι:

- Υψηλό κόστος εγκατάστασης του συστήματος,
- Δυσκολία στον έλεγχο και την επισκευή των διαρροών και κυρίως των εμφράξεων,
- Απαιτείται επιφανειακή άρδευση φυτρώματος μιας και με την ΥΣΑ το επιφανειακό στρώμα του εδάφους παραμένει ξηρό, οπότε δεν παρέχεται η αναγκαία υγρασία για το φύτευμα των σπόρων,
- Πιθανότητα ζημιών στους αγωγούς εφαρμογής από τη δράση τρωκτικών,
- Δυσκολία ανοδικής πορείας του νερού σε αδρομερή εδάφη.

2.3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Στο Πρότυπο ASAE S526.1 "Soil and Water Terminology" (ASAE Standards, 2003), η υπόγεια στάγδην άρδευση (subsurface drip irrigation) ορίζεται ως «η εφαρμογή νερού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους διαμέσου σταλακτών, με παροχές γενικά του ίδιου εύρους τιμών με την στάγδην άρδευση».

Αυτή η μέθοδος εφαρμογής του νερού δεν πρέπει να συγχέεται με την υπάρδευση (subirrigation), η οποία ορίζεται ως «η εφαρμογή νερού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους μέσω της ανύψωσης της υπόγειας στάθμης στο ριζόστρωμα». Άλλοι ορισμοί της ΥΣΑ την περιορίζουν στην τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής κάτω από το σύνηθες βάθος κατεργασίας ή σε ένα βάθος που διασφαλίζει την επιβίωσή τους καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο, υποδηλώνοντας την μονιμότητα του συστήματος.

Επειδή το βάθος κατεργασίας συχνά ποικίλει με την καλλιέργεια και τον τύπο της κατεργασίας, σε αυτήν την ανασκόπηση λαμβάνονται υπόψη όλα τα συστήματα στάγδην με αγωγούς εφαρμογής τοποθετημένους κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (> 2 cm). Ο όρος «Υπόγεια Στάγδην Άρδευση» έχει γενικά χρησιμοποιηθεί μόνον τα τελευταία 15 έως 20 χρόνια για να περιγράψει εξοπλισμό στάγδην άρδευσης κάτω από την εδαφική επιφάνεια.

Παλαιότερα, η ονοματολογία ήταν αρκετά συγκεχυμένη. Για παράδειγμα, η «υπάρδευση» κάποιες φορές αναφερόταν τόσο στην ΥΣΑ όσο και στην ανύψωση της υπόγειας στάθμης (McNamara, 1970) ή αντιστρόφως η «υπόγεια άρδευση» αναφερόταν και στις δύο μεθόδους (Braud, 1970, Goldberg et al., 1976), αλλά συχνά αναφερόταν μόνον στην ΥΣΑ (Hanson et al., 1970, Whitney, 1970, Edwards et al., 1970).

Ο όρος «στάγδην άρδευση» κάποιες φορές χρησιμοποιήθηκε μόνο για την επιφανειακή, άλλες για την υπόγεια και άλλες και για τις δύο (Sutton et al., 1985, Tollefson, 1985a, b). Ο ορισμός που δόθηκε από τους Davis and Nelson (1970a) ήταν παρόμοιος με αυτόν που δίδεται σήμερα με τη διαφορά ότι η «υπόγεια άρδευση» χρησιμοποιούνταν αντί της «υπόγειας στάγδην άρδευσης», πιθανότατα διότι αυτήν την περίοδο δεν διατίθεντο στο εμπόριο παρά ελάχιστος σε αριθμό και τύπους εξοπλισμός.

2.4. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Σύμφωνα με τον Camp (1998) στην Καλιφόρνια ο Charles Lee το 1920 πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν πήλινο σωλήνα άρδευσης με στόμια που τοποθετούνταν υψηλότερα του δικτύου στράγγισης. Οι πήλινοι αγωγοί άρδευσης προορίζονταν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τους πήλινους αγωγούς στράγγισης για να «υγραίνουν το έδαφος γύρω από τον αγωγό». Έτσι, αυτή ήταν πιθανόν μια από τις πρωιμότερες μορφές υπόγειας στάγδην άρδευσης.

Η διαθεσιμότητα του πλαστικού που ακολούθησε τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, επέτρεψε την ανάπτυξη της στάγδην, αρχικώς στην Μεγάλη Βρετανία και πιθανόν σε άλλες χώρες και αργότερα στο Ισραήλ και στις ΗΠΑ. Η υπόγεια στάγδην αποτέλεσε μέρος της ανάπτυξης της στάγδην άρδευσης τουλάχιστον στις ΗΠΑ, ξεκινώντας περίπου το 1959, στην Καλιφόρνια (Davis, 1967). Κατά την δεκαετία του 60, οι αγωγοί εφαρμογής κατασκευάζονταν από πολυαιθυλένιο ή PVC με οπές ή σχισμές που προκαλούνταν με διάτρηση ή κόψιμο στον αγωγό (Busch and Kneebone, 1966, Braud, 1970, Hanson et al., 1970, Zetzsche and Newman, 1966), ή συνδέσεις διανεμητών με κάρφωμα σε διακριτά σημεία (Whitney, 1970). Αυτά τα συστήματα λειτουργούσαν σε χαμηλές πιέσεις υπό ποικίλες συνθήκες ποιότητας και φιλτραρίσματος του νερού. Οι Whitney and Lo (1969) αξιολόγησαν την έμφραξη και απόδοση διάφορων διανεμητών, καταλήγοντας πως το πλαστικό εισηγμένο επιστόμιο ήταν ο προτιμότερος τύπος.

Κατά το 1970, εγκαταστάθηκαν δοκιμαστικά συστήματα σε εμπορικούς αγρούς και φυτείες ζαχαροκάλαμου χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τόσο πειραματικών όσο και εμπορικών διανεμητών και αγωγών εφαρμογής (Davis and Nelson, 1970a,b, Davis and Pugh, 1974, Gibson, 1974, Hanson and Patterson, 1974). Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για μια ποικιλία καλλιεργειών που περιελάμβανε εσπεριδοειδή, ζαχαροκάλαμο, ανανά, βαμβάκι, λαχανικά, φρούτα, χλοοτάπητα, αβοκάντο, γλυκό καλαμπόκι και πατάτα (Davis and Nelson, 1970a, Davis and Pugh, 1974, Edwards et al., 1970, Hanson et al., 1970, Hanson and Patterson, 1974, Phene, 1974, Phene and Beale, 1976, 1979, Phene and Sanders, 1976). Τα περισσότερα προβλήματα σχετιζόνταν με την φτωχή ομοιομορφία, την συντήρηση των συστημάτων και την έμφραξη των σταλακτών, η οποία προκαλούνταν από οξειδία του σιδήρου ή εδαφικά τεμαχίδια.

Κατά τη δεκαετία του '70, ο εξοπλισμός για την εγκατάσταση υπόγειων στάγδην συστημάτων είχε αναπτυχθεί αρκετά. Ένα μηχάνημα, ενώ εγκαθιστούσε τους αγωγούς εφαρμογής, είτε έκανε οπές ή εισήγαγε πλαστικούς διανεμητές στον σωλήνα (Zetzsche

and Newman, 1966, Whitney, 1970). Την ίδια περίπου περίοδο, αναπτύσσονταν στο Ισραήλ επιφανειακά συστήματα στάγδην άρδευσης, περιλαμβανομένου και εξοπλισμού υδρολίπανσης, (Goldberg and Shmueli, 1970). Καθώς οι εμπορικοί διανεμητές και σωλήνες γίνονταν πιο αξιόπιστοι, οι επιφανειακές εφαρμογές αναπτύχθηκαν με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι οι υπόγειες, λόγω προβλημάτων με την έμφραξη των διανεμητών και την εισχώρηση ριζών.

Στην αρχή της δεκαετίας του 1980, το ενδιαφέρον για την ΥΣΑ αυξήθηκε, πιθανότατα λόγω της μείωσης του κόστους του εξοπλισμού, του χαμηλότερου λειτουργικού κόστους του συστήματος, που ήταν αποτέλεσμα της πολυετούς χρήσης του και της βελτιωμένης διαχείρισης των λιπασμάτων. Κατά το πρώτο μισό του '80, οι δημοσιευμένες έρευνες περιλαμβάνουν πληροφορίες για το βάθος τοποθέτησης και την ισαποχή των αγωγών εφαρμογής, για την εφαρμογή χημικών, για τις αποδόσεις καλλιεργειών, για τις απαιτήσεις σε ποιότητα και φιλτράρισμα νερού και συγκρίσεις με άλλους τύπους άρδευτικών συστημάτων (Wendt et al., 1977, Sammis, 1980, Bucks et al., 1981, Mitchell, 1981, Chase, 1985a, Plaut et al., 1985).

Οι Mitchell and Tillmon (1982) ανέφεραν ότι υπόγεια συστήματα ήταν σε χρήση για 10 έτη στο ερευνητικό τους πρόγραμμα και παρείχαν οδηγίες για τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και την διαχείριση αυτών των συστημάτων. Επίσης, ο Tollefson (1985a,b) ανέφερε εφαρμογές της ΥΣΑ σε βαμβάκι και σιτάρι, σε έναν μεγάλο εμπορικό αγρό, οι οποίες άρχισαν με μια δοκιμαστική περιοχή το 1979. Το ενδιαφέρον για την ΥΣΑ αυξήθηκε κατά πολύ μετά το 1985, περίοδο κατά την οποία δημοσιεύονται οι περισσότερες εργασίες με επαναληπτικές πειραματικές μελέτες.

Πιο πρόσφατα, οι Phene et al. (1993), ο Burt (1995), οι Zoldoske and Norum (1997) και οι Ayars et al. (1999), συζητούν τα πλεονεκτήματα και πιθανούς περιορισμούς της ΥΣΑ και γενικά αναφέρουν εμπειρίες από τη χρήση υπόγειας στάγδην που προέκυψαν μετά από πολυετείς εφαρμογές.

2.5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.5.1. ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΙΣΑΠΟΧΗ ΑΓΩΓΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το βάθος του αγωγού εφαρμογής σπάνια αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας, γι' αυτό οι πληροφορίες για διαφορές στην απόδοση καλλιεργειών με το βάθος του αγωγού εφαρμογής είναι περιορισμένες. Τα βάθη των αγωγών εφαρμογής ποικίλουν από 0,02 m έως 0,70 m, εξαρτώμενα από το έδαφος και την καλλιέργεια. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάθος των αγωγών εφαρμογής ήταν πιθανόν προσαρμοσμένο στις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής και στα δεδομένα του εδάφους και των υδραυλικών χαρακτηριστικών του. Στις περιπτώσεις όπου αξιολογήθηκαν διάφορα βάθη αγωγών εφαρμογής, παρουσιάσθηκε μικρή διαφορά στην απόδοση. Σε καλλιέργεια πατάτας σε αναχώματα, οι DeTar et al. (1996) αξιολόγησαν τα βάθη τοποθέτησης αγωγών εφαρμογής των 0,08 m (πάνω από τον σπόρο) και των 0,46 m (κάτω από τον σπόρο) καλύτερα από ενδιάμεσα ή μεγαλύτερα βάθη. Οι Bryla et al. (2003) διαπίστωσαν ότι η απόδοση φάβας (*fava bean*) ήταν υψηλότερη σε βάθη τοποθέτησης 0,3 ή 0,45 m από ότι στα 0,6 m.

Για εγκαταστάσεις πολυετούς χρήσης όπου η κατεργασία του εδάφους είναι ένα ζήτημα, τα βάθη αγωγών εφαρμογής κυμάνθηκαν από 0,20 έως 0,70 m. Όπου η κατεργασία δεν λαμβανόταν υπόψη (π.χ. χλοοτάπητας, μηδική, ζαχαροκάλαμο) τα βάθη ήταν μερικές φορές μικρότερα (0,10 έως 0,40 m), εξαρτώμενα από το βάθος του ριζοστρώματος της καλλιέργειας και το έδαφος (Batchelor and Soopramanien, 1995, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003β).

Το φύτερωμα των σπόρων και η ανάπτυξη των φυταρίων ήταν άλλοι παράγοντες που επηρέασαν το βάθος του αγωγού εφαρμογής. Ο καταιονισμός ή η επιφανειακή άρδευση χρησιμοποιήθηκαν συχνά για το φύτερωμα, καθιστώντας έτσι ανάγκη την διαθεσιμότητα δύο συστημάτων, αυξάνοντας όμως τα έξοδα και μειώνοντας το οικονομικό όφελος της ΥΣΑ.

Οι Schwankl et al. (1990) διερεύνησαν τρία βάθη αγωγού εφαρμογής, τρία βάθη σποράς τομάτας και τρία επίπεδα άρδευσης (κλάσματα της εξαμισοδιαπνοής της καλλιέργειας) σε ένα αργιλλοπηλώδες έδαφος στην Καλιφόρνια. Συμπέραναν πως ο καλύτερος συνδυασμός ήταν ένα βάθος αγωγού εφαρμογής 0,15 ή 0,23 m, ένα βάθος σποράς 1,2 ή 3,8 mm και μια ημερήσια άρδευση 0,5 της ET_c ή μεγαλύτερη, μετά από μια αρχική άρδευση για την διαβροχή της επιφάνειας πάνω από κάθε πλευρικό.

Οι Al-Nabulsi et al. (2000) αξιολόγησαν την επίδραση του βάθους των αγωγών

εφαρμογής στην ανάπτυξη και απόδοση ηλιανθου, τοποθετώντας τους αγωγούς εφαρμογής επιφανειακά και σε βάθη 0,15, 0,25, 0,35 και 0,45 m. Το βάθος δεν είχε σημαντική επίδραση στον LAI, αλλά η απόδοση σε σπόρο και έλαιο ήταν καλύτερη στα βάθη των 0,25 και 0,35 m, ενώ το βάθος των 0,25 m έδωσε 22% υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης νερού σε σχέση με το επιφανειακό σύστημα. Παρ' όλα αυτά, το βάθος δεν επέδρασε σημαντικά στο μήκος ή την κατανομή των ριζών του ηλιανθου. Οι Colaizzi et al. (2006) αξιολόγησαν το φύτευμα και την απόδοση σόγιας με αγωγούς εφαρμογής τοποθετημένους σε πλατιά αναχώματα με δύο σειρές φυτών, σε κάθε ανάχωμα και σε κάθε δεύτερο αυλάκι (μεταξύ των αναχωμάτων). Το φύτευμα ήταν καλύτερο και πρωιμότερο στα πλατιά αναχώματα, αλλά η απόδοση δεν επηρεάστηκε από τον σχεδιασμό αυτό ούτε από το βάθος των αγωγών εφαρμογής (0,15, 0,22 και 0,30 m).

Γενικά, οι ερευνητές προτείνουν την τοποθέτηση των αγωγών εφαρμογής στο μικρότερο βάθος που επιτρέπουν οι καλλιεργητικές πρακτικές και στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος για την αποφυγή ή την ελαχιστοποίηση της επιφανειακής διαβροχής, εκτός αν ο σχεδιασμός προβλέπει άρδευση για φύτευμα. Η ύπαρξη αδιαπέρατης εδαφικής στρώσης που παρεμποδίζει την ανοδική κίνηση του νερού πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη.

Η ισαποχή των αγωγών εφαρμογής επίσης ποικίλει σημαντικά (0,25 έως 5,0 m), με τις στενότερες ισαποχές να χρησιμοποιούνται κυρίως για άρδευση χλοοτάπητα και τις ευρύτερες να χρησιμοποιούνται για δένδρα ή αμπέλια και για καλλιέργειες σε αναχώματα ίδιας ισαποχής. Οι Devitt and Miller (1988) διερεύνησαν διάφορες ισαποχές αγωγών εφαρμογής σε δύο εδάφη με τη χρήση αλατούχου αρδευτικού νερού σε χλοοτάπητα στη Νεβάδα και συμπέραναν ότι η ισαποχή του 0,6 m ήταν αποδεκτή σε ένα αμμοπηλώδες έδαφος αλλά μια ευρύτερη ισαποχή απαιτείται σε ένα αργιλώδες.

Σε καλλιέργειες με άλλες ισαποχές γραμμών (ζαχαροκάλαμο και ανανάς στη Χαβάη και κάποιες περιπτώσεις βαμβακιού), ο αγωγός εφαρμογής πρέπει να τοποθετείται περίπου 0,8 m από κάθε γραμμή. Κάποιες υψηλής αξίας καλλιέργειες μπορεί να απαιτούν στενότερες ισαποχές σε αμμώδη εδάφη και/ή σε ξηρές περιοχές για να διασφαλισθεί επαρκές ισοζύγιο αλάτων και ικανοποιητική ποιότητα και απόδοση των καλλιεργειών. Μεγαλύτερες ισαποχές μπορεί να είναι δυνατές σε υγρές περιοχές, με παραγωγή ικανοποιητικών αποδόσεων σε έτη με μέτρια βροχόπτωση, αλλά θα προκύψουν μειωμένες αποδόσεις σε έτη με σημαντικές περιόδους ξηρασίας, ειδικότερα για ευαίσθητες καλλιέργειες όπως ο αραβόσιτος (Phene and Sanders, 1976).

Οι Ayars et al. (1995), αναφέρουν ότι σε καλλιέργειες τομάτας και βαμβακιού σε αναχώματα, η θέση του αγωγού εφαρμογής σε σχέση με την γραμμή των φυτών ή με το ανάχωμα δεν επηρέασε την απόδοση, αλλά οι μηχανικές ζημιές στους αγωγούς εφαρμογής ήταν μεγαλύτερες όταν ο αγωγός εφαρμογής ήταν τοποθετημένος στο αυλάκι παρά όταν ήταν τοποθετημένος στο ανάχωμα κάτω από την γραμμή των φυτών. Οι Alam et al. (2000) αναφέρουν πως η απόδοση μηδικής ήταν ελαφρώς μικρότερη στην περίπτωση ισαποχής του 1,5 m έναντι του 1 m, ενώ το βάθος (0,3 και 0,46 m) έδωσε ίδιες αποδόσεις. Οι Khalilian et al. (2000) δεν διαπίστωσαν σημαντικές διαφορές στην απόδοση βαμβακιού δοκιμάζοντας τρία βάθη τοποθέτησης (20,3, 30,5 και 40,6 cm) και δύο ισαποχές αγωγών εφαρμογής (κάθε σειρά και σειρά παρά σειρά).

Οι Enciso et al. (2002) μελέτησαν την επίδραση της ισαποχής των γραμμών σποράς βαμβακιού στην αποδοτικότητα χρήσης νερού υπό διάφορα επίπεδα δόσης άρδευσης με ΥΣΑ και συμπέραναν ότι η ισαποχή των γραμμών είχε μέτρια επίδραση σε αυτήν εμφανίζοντας παρ' όλα αυτά υψηλότερη αποδοτικότητα στην στενότερη ισαποχή. Μολονότι το έδαφος και η καλλιέργεια επηρεάζουν την ισαποχή των αγωγών εφαρμογής, εμφανίζεται να υπάρχει μια γενική συμφωνία πως η τοποθέτηση σε απόσταση περίπου 1,0 m είναι επαρκής για τις περισσότερες ομοιόμορφα ισαπέχουσες γραμμικές καλλιέργειες (Phene and Beale, 1979, Camp et al., 1989, 1997a, Hutmacher et al., 1993, Powell and Wright, 1993, Lamm et al., 1995b).

2.5.2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ

Συχνότητα άρδευσης

Η συχνότητα άρδευσης διερευνήθηκε στις περισσότερες εργασίες, είτε ως προς τον χρόνο είτε ως προς την δόση άρδευσης ή αμφότερα. Οι μέθοδοι προγραμματισμού των αρδεύσεων βασίσθηκαν στην εξαμισοδιαπνοή (μετρημένη ή υπολογισμένη), στην εξάτμιση από εξαμισόμετρο ή σε απευθείας μετρήσεις ιδιοτήτων του εδάφους και του φυτού. Η συχνότητα άρδευσης ποικίλει από πολλές φορές κάθε μέρα έως μια φορά την εβδομάδα, εξαρτώμενος κυρίως από το αν η άρδευση αποσκοπούσε να χορηγήσει νερό ανάλογα με την ημερήσια υδατοκατανάλωση του φυτού ή ανάλογα με την εξάντληση της ωφέλιμης υγρασίας από το έδαφος.

Συχνότητες άρδευσης από μία έως επτά ημέρες δεν είχαν επίδραση στην απόδοση του αραβοσίτου με δεδομένο ότι η εδαφική υγρασία διατηρήθηκε σε αποδεκτά όρια εξάντλησης (Camp et al., 1989, Caldwell et al., 1994, Howell et al., 1995, 1997).

Σε μια μελέτη αυτοματοποιημένου ελέγχου της άρδευσης για αραβόσιπο, βασισμένου στις θερμοκρασίες φυλλώματος οι Evett et al. (1995, 1996) συμπέραναν πως η άρδευση με την μέθοδο αυτή είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποδόσεις από την άρδευση με αναπλήρωση του εδαφικού νερού που εξαντλήθηκε. Υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης νερού διαπιστώθηκε από τους Evett et al. (2000) σε νέα πειράματα αραβοσίτου, αλλά και σόγιας, προγραμματίζοντας την άρδευση με τις παραπάνω διαδικασίες. Οι Bucks et al. (1981) βρήκαν την ημερήσια άρδευση καλύτερη από την εβδομαδιαία στα κρεμμύδια και την εβδομαδιαία καλύτερη από την ημερήσια στα πεπόνια ενώ οι Camp et al. (1993) δεν βρήκαν διαφορά μεταξύ της άρδευσης πολλές φορές την ημέρα και της ημερήσιας εφαρμογής για διάφορα λαχανικά και φρούτα. Οι El-Gindy and El-Araby (1996) αναφέρουν μεγαλύτερες αποδόσεις σε τομάτα και αγγούρι για την ημερήσια από ότι η άρδευση κάθε τρεις ημέρες σε ένα ασβεστούχο έδαφος στην Αίγυπτο.

Οι Phene et al. (1990) ανέφεραν πως υψηλής συχνότητας εφαρμογή της ΥΣΑ με δόση 1 mm πολλές φορές την ημέρα, βασισμένη σε μετρήσεις από λυσίμετρο, απέδωσε υψηλότερη παραγωγή τομάτας από ότι η εφαρμογή 25 mm συνολικά. Οι Enciso et al. (2003) διερεύνησαν την επίδραση της συχνότητας στην απόδοση βαμβακιού σε ένα ιλυοαργιλώδες έδαφος υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης και δεν διαπίστωσαν σημαντικές διαφορές στα παραγωγικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του βαμβακιού. Οι Dukes and Scholberg (2005) εφάρμοσαν προγραμματισμό άρδευσης με βάση μετρήσεις εδαφικής υγρασίας με TDR και με καθημερινή άρδευση. Η πρώτη μέθοδος οδήγησε σε πολύ συχνή εφαρμογή νερού μικρής διάρκειας (30 min).

Ποσότητα νερού

Οι ποσότητες άρδευσης ποικίλουν σε ανάλογο βαθμό και ήταν αναλογίες (κλάσματα ή πολλαπλάσια) μιας μετρημένης ή υπολογισμένης παραμέτρου που θεωρείτο βέλτιστη, όπως η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, ή εξατμηση από εξατμισίμετρο, το έλλειμμα εδαφικού νερού ή το μητρικό δυναμικό.

Η βέλτιστη ποσότητα προσδιορίστηκε από την παραγωγή ή/και την αποδοτικότητα χρήσης νερού. Οι Fangmeier et al. (1989) βρήκαν μέγιστη απόδοση βαμβακιού με 1,3 της εξατμισοδιαπνοής (ET_c) και μέγιστη αποδοτικότητα χρήσης νερού με 1,0 ET_c. Οι Caldwell et al. (1994) δεν βρήκαν επίδραση της συχνότητας ή της ποσότητας άρδευσης στο καλαμπόκι στο Κάνσας όταν η εξάντληση της διαθέσιμης

υγρασίας ήταν <20%. Οι Lamm et al. (1995a) αναφέρουν στατιστικώς ίδιες παραγωγές καλαμποκιού όταν η άρδευση ήταν μεγαλύτερη από 0,75 ET_c.

Οι αποδόσεις και/ή η υδατική καταπόνηση του φυτού πολύ λίγο επηρεάστηκαν από μειωμένες ποσότητες άρδευσης (0,6 – 0,7 ET_c) στο βαμβάκι (Hutmacher et al., 1995) και στον αραβόσιτο (Howell et al., 1997), με δεδομένο ότι η άρδευση ήταν επαρκής για την διατήρηση αποδεκτών επιπέδων ελλείμματος εδαφικής υγρασίας. Ομοίως, διάφορα κλάσματα (0,4–1,0) εξάτμισης από εξατμισίμετρο (E_p) χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της ποσότητας άρδευσης για βαμβάκι στο Ισραήλ (Plaut et al., 1985) και σε καλαμπόκι στη Βιρτζίνια (Powell and Wright, 1993). Συστήματα αυτοματοποιημένων εξατμισιμέτρων χρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση βαμβακιού (Phene et al., 1992a) και πατάτας (DeTar et al., 1996) στην Καλιφόρνια και για οπωρώνες σε ξηρή περιοχή (Phene, 1996).

Οι Bucks et al. (1981) αναφέρουν μέγιστη απόδοση πεπονιών και κρεμμυδιών για 1.0 ET_c, αλλά καμιά διαφορά στην απόδοση καρότων, για ένα εύρος αρδευτικών ποσοτήτων βασισμένων στην ET_c. Για μια περιορισμένη παροχή νερού, οι Batchelor et al. (1994) διερεύνησαν διάφορες αρδευτικές ποσότητες βασισμένες στην εξάντληση της υγρασίας σε *capota*, μπάμια και τομάτα στη Ζιμπάμπουε και βρήκαν μέγιστες τιμές αποδοτικότητας χρήσης νερού σε αρδευτικές ποσότητες χαμηλές έως και 0,55 – 0,85 εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας. Οι Martin et al. (1996) δεν βρήκαν διαφορά παραγωγής σε καρότα, κουνουπίδι, μαρούλι, κρεμμύδια και τομάτα για ένα εύρος επιπέδων εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας (20% έως 45%).

Οι Davis et al. (1985) βρήκαν ότι μείωση των αρδευτικών ποσοτήτων περισσότερο από 14 ημέρες πριν τη συγκομιδή μείωσε την απόδοση της τομάτας στην Καλιφόρνια. Δεν βρέθηκαν διαφορές με διαφορετικές ποσότητες εφαρμογής αρδευτικού νερού βασισμένων σε εξατμισίμετρο σε πιπεριές στη Λουιζιάνα (Bracy et al., 1995). Οι Sutton et al. (1985) αναφέρουν καλύτερη απόδοση τομάτας υπό πλήρη διαθεσιμότητα νερού (βασισμένη σε μετρήσεις μητρικού δυναμικού του εδάφους) από ότι με δύο ποσότητες κλάσματα της πλήρους. Οι Hanson and May (2000) παρέχοντας σε καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας 30, 45, 60, 75 και 90% της εξατμισοδιαπνοής, διαπίστωσαν μείωση της παραγωγής με την μείωση της ποσότητας νερού κατά 10,1 έως 27,2% μεταξύ της μεγαλύτερης και της μικρότερης ποσότητας.

Πολλές από τις μελέτες αξιολόγησης του προγραμματισμού άρδευσης στην υπόγεια στάγδην ξεκίνησαν πιθανόν για να προσδιορίσουν αν η μειωμένη εξάτμιση και

η βελτιωμένη αποδοτικότητα θα είχαν μια μετρούμενη επίδραση στην απαίτηση σε άρδευση ή στον χρόνο εφαρμογής της. Τα δημοσιευμένα αποτελέσματα δεν απαντούν σε αυτήν την ερώτηση με σαφήνεια – μείωση του αρδευτικού νερού αναφέρεται σε κάποιες περιπτώσεις. Παρά ταύτα, οι Phene et al. (1989) και οι Howell et al. (1997) αναφέρουν ότι οι τιμές της εξαμισοδιαπνοής στην ΥΣΑ ήταν ίδιες με αυτές άλλων αρδευτικών συστημάτων σε τομάτα και αραβόσιτο. Δεν υπάρχει πιθανόν καθολική απάντηση επειδή επιδρούν αρκετοί παράγοντες όπως ο βαθμός της επιφανειακής διύγρανσης είτε από άρδευση είτε από βροχή, ο βαθμός φυτοκάλυψης κατά τη βλαστική περίοδο και η επίδραση της βροχόπτωσης ή/και της άρδευσης στην ανάπτυξη και δραστηριότητα των ριζών.

Διάφορες μετρήσεις παραμέτρων των φυτών περιλαμβάνονται στις αναφερόμενες εργασίες, από απλές έως πολύπλοκες. Η μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, του υδατικού δυναμικού των φύλλων και της θερμοκρασίας του φυλλώματος είναι οι πιο κοινές (Fangmeier et al., 1989, Hiler and Howell, 1973, Hutmacher et al., 1985, 1995, Wendt et al., 1977). Η αγωγιμότητα των στοματίων (stomatal conductance) μετρήθηκε σε τομάτα και βαμβάκι από τους Hutmacher et al. (1985, 1995) και σε δένδρα από τους Shrive et al. (1994).

Ποιότητα νερού

Σε σχετικά λίγες εργασίες δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ποιότητα του νερού. Οι περιπτώσεις αλατούχου αρδευτικού νερού είναι οι πιο πολλές ενώ κάποιες αφορούσαν την παροχή νερού πλούσιου σε θείο (Adamsen, 1989).

Αρκετές αναφορές αφορούσαν στη χρήση υγρών αποβλήτων με τη χρήση συστημάτων ΥΣΑ. Οι Phene and Ruskin (1995) παρουσίασαν τη χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σε γεωργικές καλλιέργειες και καλλωπιστικά φυτά βασισμένοι στην εμπειρία με τη διαχείριση διαφόρων θρεπτικών ουσιών, κυρίως του Ν και του νερού, για να αποφύγουν την έκπλυση από το ριζόστρωμα. Ο Ruskin (1992) επίσης εξέτασε τα προβλήματα και πιθανές λύσεις για την εφαρμογή του απόβλητου νερού μέσω συστημάτων ΥΣΑ. Ο Gushiken (1995) περιέγραψε δύο μεγάλα προγράμματα στη Χαβάη, όπου το απολυμασμένο με δευτεροβάθμια επεξεργασία νερό χρησιμοποιήθηκε σε μόνιμα συστήματα ΥΣΑ, για μια ποικιλία φυτών πρασίνου και χλοοτάπητα και για καρποφόρα και καλλωπιστικά δέντρα. Επεξεργασμένο νερό χρησιμοποιήθηκε σε συστήματα ΥΣΑ για καλαμπόκι, βαμβάκι, σιτάρι και μπιζέλια στο

Ισραήλ (Oron et al., 1991). Οι Shrive et al. (1994) χρησιμοποίησαν επιτυχώς υγρά από διήθηση χώρων υγιεινής ταφής αστικών απορριμμάτων για να αρδεύσουν σφένδαμο και λεύκες χρησιμοποιώντας καταιονισμό, επιφανειακή και υπόγεια στάγδην άρδευση, στον Καναδά. Οι Trooien et al. (2000) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα ΥΣΑ για άρδευση με υγρά ζωικά απόβλητα χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα έμφραξης στους αγωγούς εφαρμογής για μια περίοδο δύο ετών. Οι Jnad et al. (2000, 2001) μετά από εξαετή λειτουργία συστήματος ΥΣΑ με χρήση αστικών αποβλήτων, διαπίστωσαν μείωση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας κατά 85% κάτω από το επίπεδο του σταλάκτη, ο οποίος ήταν τοποθετημένος σε βάθος 7,5 cm.

Η χρησιμοποίηση συστημάτων ΥΣΑ για άρδευση με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα αποτελεί βασική ερευνητική δραστηριότητα του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, από την οποία έχουν προκύψει σημαντικά συμπεράσματα για την ωφελιμότητα της χρήσης ΥΣΑ σε καλλιέργεια βαμβακιού (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2006β, 2007α), σε χλοοτάπητα και καλλωπιστικά φυτά (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003β, 2004, 2005γ, Sakellariou-Makrantonaki et al., 2003b, 2004, 2005b,c,d) και σόργο (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2006a, b, 2007).

Έκχυση χημικών

Ένα πλεονέκτημα τόσο της υπόγειας όσο και της επιφανειακής άρδευσης με σταγόνες, είναι η δυνατότητα να εφαρμοστούν με χαμηλό κόστος, οι διάφορες χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών ουσιών, του χλωρίου, οξέων και φυτοφαρμάκων, ανά τακτά διαστήματα καθ' όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου των φυτών. Οι συχνές εφαρμογές θρεπτικών, μπορούν να μειώσουν τις απώλειες λόγω έκπλυσης, ειδικά του Ν και μπορεί να μειώσουν την απαίτηση σε λιπάσματα. Ενώ το αποτελεσματικό φιλτράρισμα του νερού αποτελεί κυρίαρχο ζήτημα και η έκχυση χημικών ουσιών (τριφλουραλίνη) για την αποφυγή έμφραξης των διανεμητών είναι σημαντική για την μακροζωία των συστημάτων ΥΣΑ. Οι χημικές ουσίες που απαιτούνται για την ορθή διαχείριση ενός συστήματος εξαρτώνται πρωτίστως από την ποιότητα νερού, αλλά και από τον τύπο και τις συνθήκες του εδάφους. Χλώριο και άλλες χημικές ουσίες εγχύονται στα περισσότερα συστήματα για την αποφυγή βιολογικής δραστηριότητας και ανάπτυξης μέσα στο σύστημα. Οξέα απαιτούνται συχνά για την αποφυγή ιζημάτων στους σταλάκτες, για την αφαίρεση περιοδικά των ιζημάτων από τους σταλάκτες και για τον έλεγχο του pH του νερού.

Οι δόσεις συγκεκριμένων θρεπτικών ουσιών για τη μέγιστη απόδοση καλλιεργειών ή τη μέγιστη οικονομική πρόσοδο, αναφέρονται σε αρκετές εργασίες. Από τους Bracy et al. (1995) αναφέρεται καμία επίδραση του αζώτου στην απόδοση πιπεριάς και τομάτας από τους Clark et al. (1991), ενώ ίσες αποδόσεις με διαφορετικές δόσεις αζώτου αναφέρθηκαν από τους Camp et al. (1997a) για το βαμβάκι και από τους Neibling and Brooks (1995) για τις πατάτες. Αυξημένη παραγωγή γλυκού καλαμποκιού αναφέρθηκε από τους Phene and Beale (1979) με δόσεις λιπασμάτων N και K έως 168 kg/ha, αλλά όχι για υψηλότερες δόσεις. Οι Thompson et al. (2003) σε τριετή μελέτη σε καλλιέργεια μπρόκολου, διαπίστωσαν πως η απόδοση επηρεάστηκε από την αζωτούχο λίπανση, όχι όμως από τη συχνότητα εφαρμογής της. Αύξηση της παραγωγής με προσθήκη P, ακόμα και σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε διαθέσιμο P, αναφέρεται από τους Phene et al. (1986) για τομάτα, από τους Bar-Yosef et al. (1989) για γλυκό καλαμπόκι αλλά όχι για βαμβάκι και από τους Rubeiz et al. (1989) για λάχανο και κολοκύθια.

Ο Chase (1985b) αναφέρει μεγαλύτερη απόδοση μαρουλιού όταν ο P εφαρμόστηκε μέσω του συστήματος άρδευσης από ότι όταν εφαρμόστηκε στα πεταχτά. Ο Mikkelsen (1989) συμπέρανε ότι λιγότερος P απαιτείται στην ΥΣΑ επειδή εφαρμόζεται απευθείας στο ριζόστρωμα.

2.5.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σχεδιασμός, εγκατάσταση και διαχείριση

Οι διαδικασίες για τον σχεδιασμό συστημάτων επιφανειακής στάγδην είναι γενικώς εφαρμόσιμες στα ΥΣΑ συστήματα, ιδίως σε σχέση με την υδραυλική λειτουργία και την ομοιομορφία. Παρά ταύτα, πολύ καλό φιλτράρισμα, συχνή έκπλυση του συστήματος και εγκατάσταση βαλβίδων ανακούφισης απαιτούνται για την αποφυγή έμφραξης και την εξασφάλιση μακροβιότητας του συστήματος. Η επισκευή και αντικατάσταση των ΥΣΑ συστημάτων είναι πιο δαπανηρή από ότι στα επιφανειακά στάγδην συστήματα.

Οι Jorgensen and Norum (1993) είναι πιθανώς η πιο περιεκτική πηγή για συστήματα σε ξηρές περιοχές, αλλά οι γενικές οδηγίες είναι εφαρμόσιμες και σε άλλες περιοχές. Σε λίγες εργασίες συζητούνται οι απαιτήσεις σε φιλτράρισμα για συστήματα ΥΣΑ. Οι απαιτήσεις σε φιλτράρισμα είναι όμοιες με αυτές για τα επιφανειακά συστήματα, εκτός από το ότι οι συνέπειες από την έμφραξη των σταλακτών είναι μεγαλύτερες. Οι εμφραγμένοι σταλάκτες είναι πιο δύσκολο να εντοπισθούν και η

αντικατάστασή τους είναι πιο δύσκολη και πιο δαπανηρή από ότι στα επιφανειακά συστήματα. Λόγω του ότι οι σταλάκτες στα συστήματα ΥΣΑ αναμένεται να λειτουργήσουν ικανοποιητικά για μια μεγαλύτερη διάρκεια (>10 έτη), οι τεχνικές φιλτραρίσματος που μειώνουν την συσσωρευτική έμφραξη των σταλακτών ίσως έχουν σχετικά μεγαλύτερη σημαντικότητα από ότι στα επιφανειακά συστήματα. Οι Hanson et al. (2000) σε μια επισκόπηση της χρήσης της στάγδην άρδευσης στην Καλιφόρνια, το Τέξας και την Αριζόνα, αναφέρουν τους τύπους των αγωγών εφαρμογής που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ΥΣΑ, ανάμεσα στους οποίους είναι και πλευρικοί κατασκευασμένοι από Ελληνική βιομηχανία.

Πολλά βοηθήματα και προγράμματα Η/Υ είναι διαθέσιμα για τον σχεδιασμό επιφανειακών συστημάτων. Όμως, η κατανομή του νερού στο εδαφικό προφίλ για την ΥΣΑ είναι διαφορετική από ότι στην επιφανειακή στάγδην. Έτσι, αναπτύχθηκαν κάποια μαθηματικά μοντέλα ειδικά για τον σχεδιασμό συστημάτων ΥΣΑ. Ο Philip (1968) ανέπτυξε μαθηματική θεωρία για δι- και τρισδιάστατη ακόρεστη ροή από θαμμένες σημειακές πηγές και σφαιρικές κοιλότητες. Ένα μονοδιάστατο, δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης για αυτοματοποιημένη ΥΣΑ αναπτύχθηκε από τους van Bavel et al. (1973). Οι Gilley and Allred (1974a,b) συνδύασαν μιαν αναλυτική επίλυση με ένα μοντέλο πρόσληψης νερού για να προσδιορίσουν το βάθος και την ισαποχή αγωγών εφαρμογής και συνέκριναν υπολογισμένες και μετρημένες τιμές.

Οι Zachman and Thomas (1973) περιέγραψαν την φυσική της διήθησης από μια υπόγεια γραμμική πηγή και οι Thomas et al. (1974) ανέπτυξαν μιαν αναλυτική επίλυση, την οποία συνέκριναν με τις πρωτότυπες, πιο πολύπλοκες επιλύσεις των Zachman και Thomas. Οι Thomas et al. (1977) αναφέρουν παρόμοιες τιμές (με λίγες εξαιρέσεις) για υπολογισμένες και μετρημένες τιμές υδατικού δυναμικού για δύο εδάφη σε εδαφολεκάνες με κριθάρι και καλαμπόκι σε ένα θερμοκήπιο. Ο Dirksen (1978) περιέγραψε την παροδική και σταθερή ροή από τέσσερις ισαπέχουσες γραμμικές πηγές με σταθερό ύψος φορτίου και συνέκρινε υπολογισμένες τιμές με αυτές που μετρήθηκαν σε μια εδαφολεκάνη χρησιμοποιώντας γ-ακτινοβολία. Οι Warrick et al. (1980) αναφέρουν ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της τρισδιάστατης ροής της υγρασίας με πρόσληψη από τις ρίζες για διάφορες υπόγειες πηγές.

Οι Ben-Asher and Phene (1993) παρουσίασαν ένα αριθμητικό μοντέλο για την ανάλυση διδιάστατης ροής νερού για επιφανειακά και υπόγεια συστήματα στάγδην. Πρότειναν πως μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί ως μια πρώτη προσέγγιση στο

σχεδιασμό, ειδικότερα για τον καθορισμό του βέλτιστου βάθους των αγωγών εφαρμογής και της ισαποχής των σταλακτών. Ο Or (1995) χρησιμοποίησε μια στοχαστική προσέγγιση για να αναπτύξει αναλυτικές εκφράσεις συσχετισμού των μεταβολών των υδραυλικών παραμέτρων του εδάφους με την αναμενόμενη μεταβλητότητα του μητρικού δυναμικού και του σχετικού κορεσμού, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό του αριθμού και της θέσης τοποθέτησης αισθητήρων. Οι Coelho and Or (1996) παρουσίασαν ένα παραμετρικό μοντέλο για διδιάστατη ροή νερού και πρόσληψης από καλαμπόκι για τέσσερις διατάξεις φυτού-σταλάκτη.

Οι Bristow et al. (2000) προσομοίωσαν την κατανομή του νερού και χημικών επιβεβαιώνοντας την μικρή ανοδική κίνηση στα αμμώδη εδάφη, ενώ οι Cote et al. (2003) προσομοίωσαν την κατανομή του νερού και των λιπασμάτων υπό στρατηγικές διακοπόμενης εφαρμογής. Τέλος, οι Battam et al. (2003) παρουσιάζουν μια τεχνική προσδιορισμού παραμέτρων σχεδιασμού συστημάτων ΥΣΑ μέσω της παρατήρησης του υγρού μετώπου στο πεδίο.

Ομοιομορφία

Ένα σημαντικό ζήτημα στα συστήματα ΥΣΑ είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας και η ομοιομορφία παροχής των διανεμητών του συστήματος. Η μέτρηση της ομοιομορφίας στην ΕΣΑ είναι απλή και άμεση αλλά είναι πολύ δύσκολη στην ΥΣΑ διότι οι σταλάκτες είναι κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και δεν είναι εύκολο να παρατηρηθούν και να μετρηθούν. Όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ομοιομορφία εφαρμογής σε επιφανειακά στάγδην συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στα υπόγεια συστήματα, αλλά οι σταλάκτες πρέπει να εκσκαφτούν για να μετρηθούν οι παροχές. Οι μετρήσεις πίεσης και παροχής του συστήματος είναι χρήσιμες για την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος και χρησιμοποιούνται σε διάφορες μεθόδους προσδιορισμού της ομοιομορφίας του συστημάτων ΥΣΑ.

Οι Phene et al. (1992b) μέτρησαν την ομοιομορφία του συστήματος για διάφορους τύπους σταλακτηφόρων, μετά από εννέα χρόνια λειτουργίας και σύγκριναν τις μετρημένες τιμές με τιμές που εξήχθησαν με τη χρήση διαφόρων μοντέλων (Yue et al., 1993), συμπεραίνοντας πως τα μοντέλα μπορούν με ακρίβεια να προβλέψουν την ομοιομορφία συστημάτων ΥΣΑ, θεωρώντας πως η έμφραξη είναι ελάχιστη. Οι Camp et al. (1997b) αξιολόγησαν επιφανειακά και υπόγεια συστήματα μετά από οχτώ έτη

λειτουργίας, αναφέροντας μεγαλύτερη μείωση της ομοιομορφίας στα συστήματα ΥΣΑ από ότι στα ΕΣΑ, κυρίως λόγω της έμφραξης των σταλακτών που προκλήθηκε από είσοδο εδαφικών τεμαχιδίων στους κύριους και δευτερεύοντες αγωγούς κατά την εγκατάσταση του συστήματος. Μετά από χρήση πέντε ετών ο Mitchell (1981) αναφέρει πως δεν παρατηρήθηκε καταστροφή ενός πορώδους αγωγού εφαρμογής, αλλά παρατήρησε μειωμένες παροχές. Η μείωση της παροχής ήταν μικρότερη σε αγωγούς εφαρμογής όπου άνυδρη αμμωνία είχε εγχυθεί ως πηγή αζωτούχου λίπανσης.

Άλλοι ερευνητές αναφέρουν μετρήσεις, εκτιμήσεις και παρατηρήσεις ομοιομορφίας ή έμφραξης σταλακτών (Bar-Yosef et al., 1991, Chase, 1985a, Kruse and Israeli, 1987, Mizyed and Kruse, 1989). Οι Sadler et al. (1995) μελέτησαν την επίδραση της εκσκαφής σταλακτών στην παροχή τους και την μέτρηση της ομοιομορφίας, παρατήρησαν σφάλματα και προσδιόρισαν την επίδραση της εκσκαφής υπόγειων σταλακτών στην παροχή αυτών και στην μέτρηση της ομοιομορφίας.

Οι Zimmer et al. (1988) παρατήρησαν κίνηση του νερού από υπόγειους σταλάκτες στην εδαφική επιφάνεια. Οι Warrick and Shani (1996) μελέτησαν την περιορισμένη από το έδαφος ροή από υπόγειους σταλάκτες και πρότειναν τη χρήση μικρότερων παροχών, περισσότερων και αυτορυθμιζόμενων σταλακτών για την βελτίωση της ομοιομορφίας υπό κάποιες εδαφικές συνθήκες, ειδικότερα για υψηλής μεταβλητότητας εδάφη.

Οι Amali et al. (1997) σύγκριναν την ομοιομορφία της υγρασίας σε ένα αργιλλοπηλώδες έδαφος και διαπίστωσαν πως η ΥΣΑ είχε ως αποτέλεσμα χαμηλή ομοιομορφία επάνω από τους σταλάκτες ενώ κάτω από αυτούς ήταν στα ίδια επίπεδα με αυτά της άρδευσης με αυλάκια.

Ο Berkowitz (2001) αξιολόγησε την απόδοση συστημάτων ΥΣΑ για άρδευση με υγρά απόβλητα στη Βόρεια Καρολίνα και αναφέρει πως μετά από εξαετή και πλέον λειτουργία η υδραυλική συμπεριφορά των συστημάτων ήταν άριστη. Οι Bordovsky and Porter (2006) αναφέρουν πως η απόδοση βαμβακιού δεν ακολούθησε την προσχεδιασμένη ανομοιομορφία ενός συστήματος ΥΣΑ και προτείνουν χαλαρότερες προδιαγραφές στην σχεδιαστική ομοιομορφία σε σχέση με τα επιφανειακά συστήματα.

Οι Camp et al. (1997b) σύγκριναν διάφορα μέτρα ομοιομορφίας, συμπεραίνοντας πως οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται (εκτός των μοντέλων) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση συστημάτων ΥΣΑ και πρότειναν ιδιαίτερη προσοχή κατά την αξιολόγηση συστημάτων με έμφραξη (μερική ή ολική), επειδή οι

περισσότερες των μεθόδων θεωρούν μια κανονική κατανομή των δεδομένων, γεγονός το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση εμφραγμένων σταλακτών. Τα υπάρχοντα μοντέλα, επειδή είχαν αναπτυχθεί κυρίως για τον σχεδιασμό και την ομοιομορφία νέων συστημάτων, δεν μπορούν να λάβουν υπόψη την επίδραση της έμφραξης των σταλακτών στην ομοιομορφία.

Σε κάποιες εργασίες αναφέρεται η εισχώρηση ριζών στους υπόγειους σταλάκτες, ζήτημα το οποίο είναι μια βασική έγνοια στα υπόγεια στάγδην συστήματα, αλλά αρκετοί ερευνητές αναφέρουν λύσεις και γενικά σχόλια. Οι Ruskin et al. (1990) περιγράφουν την ενσωμάτωση ενός ζιζανιοκτόνου ελεγχόμενης αποδέσμευσης στους πλαστικούς σταλάκτες για την αποφυγή της εισόδου ριζών για μια περίοδο 10 ετών ή περισσότερο όταν είναι τοποθετημένοι στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών. Οι Solomon and Jorgensen (1992) αξιολόγησαν διάφορους σταλάκτες για χρήση στο γκαζόν και όλοι εκτός από δύο αντιμετώπισαν εισχώρηση ριζών. Οι Zoldoske et al. (1995) αναφέρουν πως σε έναν μόνον σταλάκτη, από πολλούς που χρησιμοποιήθηκαν, με ζιζανιοκτόνο ενσωματωμένο στο πλαστικό, δεν παρατηρήθηκε εισχώρηση ριζών μετά από πενταετή χρήση. Οι Ayars et al. (1999) αναφέρουν πως η ομοιομορφία συστημάτων ΥΣΑ μετά από εννέα έτη λειτουργίας ήταν τόσο υψηλή όσο και κατά την εγκατάσταση, εκεί όπου είχαν ακολουθηθεί οι κατάλληλες διαδικασίες για την αποφυγή εισχώρησης ριζών στους σταλάκτες.

Διάφορα ζητήματα

Ένα άλλο ζήτημα που αναφέρεται στην ΥΣΑ είναι η χρήση εύκαμπτων αγωγών εφαρμογής (λεπτού τοιχώματος) σε περιοχές όπου η κίνηση μηχανημάτων ή η φυσική συμπίεση (soil consolidation) μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση ή σπάσιμο των αγωγών εφαρμογής με συνεπακόλουθη ανομοιομορφία του συστήματος. Οι Hills et al. (1989) ανέφεραν απώλεια πίεσης, μειωμένη παροχή και την ανάγκη ρύθμισης του μήκους του αγωγού εφαρμογής, σε αγωγούς εφαρμογής μονού ή διπλού θαλάμου, των οποίων η διατομή παραμορφώθηκε (από κυκλική σε ελλειπτική) σε δοκιμές στο εργαστήριο. Ο Chase (1985a) ανέφερε μηχανικές ζημιές και επίδραση της συμπίεσης σε αγωγούς εφαρμογής τοποθετημένους 0,08 έως 0,13 m, σε αναχώματα από καλλιεργητικά εργαλεία χειρός και κίνηση μηχανημάτων. Οι Camp et al. (1999) διεξήγαγαν διετές πείραμα άρδευσης σίτου, σόγιας και βαμβακιού με μηδενική κατεργασία όπου διαπίστωσαν σημαντική συμπίεση τους επιφανειακού εδάφους (< 5

cm).

Κάποιοι ερευνητές προτείνουν την εγκατάσταση ενός φράγματος, είτε πλαστικού είτε από μεταλλικό έλασμα, κάτω από τον πλευρικό για μεταβολή της ροής και της κατανομής του νερού, κυρίως από κατακόρυφη καθοδική σε οριζόντια (Barth, 1995, 1999, Welsh et al., 1995, Charlesworth and Muirhead, 2003). Οι Brown et al. (1996) αναφέρουν ένα μικρό αλλά ουσιαστικό όφελος από ένα σχήματος V υμένα πολυαιθυλενίου τοποθετημένου κάτω από υποεπιφανειακούς αγωγούς εφαρμογής, προκαλώντας κυρίως την διαμόρφωση του διαβρεχόμενου όγκου σε λίγο υψηλότερο επίπεδο και με μεγαλύτερο πλάτος από ότι μια συμβατική τοποθέτηση. Οι Ben-Gal et al. (2004) σε αμπελώνα, τοποθέτησαν σταλακτηφόρους στον πυθμένα τάφρων βάθους 0,4 m και πλάτος 0,2 m που γέμισαν με χαλίκι και διαπίστωσαν ότι αυτή η τεχνική παρήγαγε μεγαλύτερη οριζόντια κατανομή του νερού, των ριζών και χημικών σε σχέση με τη «συμβατική» με σταλακτηφόρους τοποθετημένους στο ίδιο βάθος.

Άλλοι ερευνητές αναφέρουν χημικές μεταβολές του εδάφους που προκλήθηκαν από διάφορα λιπάσματα, γύψο (Grimes et al., 1990) και οργανικό υλικό (Mitchell and Sparks, 1982). Αρκετοί αναφέρουν πληροφορίες για την ανάπτυξη των ριζών (Mitchell and Sparks, 1982, Phene et al., 1991, Phene, 1995a, Plaut et al., 1996) και ζημιές από έντομα και τρωκτικά σε αγωγούς εφαρμογής (Chase, 1985a). Ο Vyrlas (1992), ο Βύρλας (1995) και ο Βύρλας κ.α. (2003) διερεύνησαν την επίδραση της υποπίεσης και του εδαφικού τύπου στην εισρόφηση από τους σταλάκτες εδαφικών τεμαχιδίων σε εργαστηριακά πειράματα ενώ οι Coehlo and Resende (2005) διαπίστωσαν εισρόφηση εδαφικού υλικού σε επτά συμβατικούς και επτά αυτορυθμιζόμενους σταλάκτες.

Η μειωμένη ανάπτυξη ζιζανίων αναφέρεται από αρκετούς ερευνητές ως πλεονέκτημα της ΥΣΑ, αφού τμήματα της επιφάνειας του αγρού, κυρίως μεταξύ των σειρών των φυτών, δεν διαβρέχονται, αλλά σε λίγες εργασίες δίδονται δεδομένα μετρήσεων. Οι Grattan et al. (1990) αναφέρουν μειωμένη ανάπτυξη ζιζανίων στην Καλιφόρνια με χρήση ΥΣΑ συγκρινόμενη με άρδευση με αυλάκια και καταιονισμό. Με τα μισά τεμάχια μεταχειριζόμενα με ζιζανιοκτόνα, η ΥΣΑ χωρίς ζιζανιοκτόνα ήταν τουλάχιστον τόσο αποτελεσματική όσο ο καταιονισμός και τα αυλάκια με ζιζανιοκτόνο. Παρά ταύτα, αυτό το αποτέλεσμα δεν αναμένεται σε περιοχές όπου η βροχόπτωση είναι ικανή και επομένως επαρκής για την βλάστηση και ανάπτυξη ζιζανίων. Η μειωμένη διαβροχή της εδαφικής επιφάνειας μπορεί επίσης να επιδράσει στο μικροκλίμα και το περιβάλλον του φυτού. Οι Scherm and van Bruggen (1995) αναφέρουν μια

χαμηλότερη ένταση περονόσπορου στο μαρούλι αρδευόμενο με ΥΣΑ από ότι με αυλάκια σε τέσσερις περιοχές της Καλιφόρνιας, η οποία αποδόθηκε στις μακρύτερες περιόδους ύγρυνσης των φύλλων και στην τάση για υψηλότερη υγρασία κατά την διάρκεια της ημέρας στην άρδευση με αυλάκια.

2.5.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Η ΥΣΑ συγκρίθηκε με άλλους τύπους αρδευτικών συστημάτων σε πολλές εργασίες. Σε πολλές περιπτώσεις, οι αποδόσεις των καλλιεργειών για συστήματα ΥΣΑ ήταν ίσες ή μεγαλύτερες από αυτές των άλλων συστημάτων. Στην Βιρτζίνια, η παραγωγή φυσιτικών ήταν μεγαλύτερη για την ΥΣΑ από ότι με καταιονισμό όταν χρησιμοποιήθηκε θειούχο νερό, αλλά δεν υπήρξε αύξηση όταν χρησιμοποιήθηκε νερό καλής ποιότητας. Η απόδοση καλαμποκιού δεν διέφερε μεταξύ ΥΣΑ και καταιονισμού αλλά η ΥΣΑ κατανάλωσε 30% λιγότερο νερό (Adamsen 1989). Η αποδόσεις βαμβακιού ήταν μεγαλύτερες με ΥΣΑ από ότι με αυλάκια σε ένα ιλυώδες έδαφος αλλά όχι στην περίπτωση ενός αμμώδους (Phene et al., 1992a). Παρά ταύτα, και στις δύο περιπτώσεις χρειάστηκε αρκετά λιγότερο νερό στην ΥΣΑ. Ο Henggeler (1995) αναφέρει μια αύξηση της απόδοσης βαμβακιού της τάξης του 20% με ΥΣΑ έναντι των αυλακιών χρησιμοποιώντας δεδομένα από πολλές περιοχές του δυτικού Τέξας.

Οι αποδόσεις μηδικής ήταν ίδιες για ΥΣΑ και καταιονισμό στη Χαβάη, αλλά χρειάστηκε περισσότερος μόχθος για την τοποθέτηση και απομάκρυνση των εκτοξευτών σε κάθε κοπή (Bui and Osgood, 1990). Οι Zoldoske et al. (1995) αναφέρουν παρόμοια αποτελέσματα για χλοοτάπητα αρδευόμενο με ΥΣΑ και καταιονισμό, αλλά οι δαπάνες συντήρησης και η χρήση νερού ήταν μεγαλύτερες με το σύστημα καταιονισμού. Η απόδοση ζαχαροκάλαμου ήταν μεγαλύτερη για ΥΣΑ από ότι με αυλάκια στην Χαβάη (Moore and Fitschen, 1990).

Σαφή υπεροχή της ΥΣΑ έναντι της επιφανειακής, με μεγαλύτερους ρυθμούς αύξησης και σημαντικά μεγαλύτερη τελική απόδοση ξηρής βιομάζας, με παράλληλη εξοικονόμηση αρδευτικού νερού, ήταν το αποτέλεσμα πειραματικής μελέτης σε καλλιέργεια σόργου (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2003a). Σημαντική επίσης αύξηση με ΥΣΑ αναφέρεται επίσης στο σόργο συγκριτικά με τον καταιονισμό (Sakellariou – Makrantonaki et al., 2003a, 2005a), όπως επίσης και σε σόργο αρδευόμενο με επεξεργασμένο νερό μέσω ΥΣΑ έναντι της ΕΣΑ (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2006α,γ, Sakellariou – Makrantonaki et al., 2006a, 2007). Οι

Colaizzi et al. (2004) σε τριετή μελέτη σε καλλιέργεια σόργου, σύγκριναν την ΥΣΑ με την εφαρμογή νερού με αυτοκινούμενο αρδευτή (center pivot), με συμβατικούς ψεκαστές ή ψεκαστές χαμηλής πίεσης (low energy precision application). Η ΥΣΑ παρουσίασε υψηλότερη απόδοση σόργου και υψηλότερη αποδοτικότητα σε επίπεδα άρδευσης 25% και 50% της ΕΤ.

Οι Ayars et al. (2001) σε τριετή εφαρμογή υπόγειας στάγδην και άρδευσης με αυλάκια σε βαμβάκι και τομάτα, διαπίστωσαν βελτίωση της απόδοσης του βαμβακιού με ΥΣΑ κατά το τρίτο έτος ενώ η άρδευση με αυλάκια παρέμεινε η ίδια. Η απόδοση της τομάτας ήταν υψηλότερη στην ΥΣΑ έναντι των αυλάκων και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους. Ίδιες παραγωγές με χρήση ΥΣΑ και ΕΣΑ αναφέρονται για τον αραβόσιτο (Camp et al., 1989, Howell et al., 1995, 1997, Mitchell and Sparks, 1982, Powell and Wright, 1993), για το βαμβάκι (Plaut et al., 1985), το σόργο (Hiler and Howell, 1973) και για δένδρα αρδευόμενα με απόβλητα (Shrive et al., 1994). Σε κάποιες περιπτώσεις, ειδικά στο βαμβάκι, η μείωση της απόδοσης με την μείωση της ποσότητας του νερού άρδευσης ήταν αρκετά μικρότερη με την ΥΣΑ (Plaut et al., 1985, Kalfountzos et al., 2004) ή η διαφορά στην παραγωγή ήταν μεγαλύτερη με την ΥΣΑ για ένα έδαφος αλλά όχι σε άλλο (Phene et al., 1992a).

Οι αποδόσεις κηπευτικών καλλιεργειών που αρδεύτηκαν με ΥΣΑ ήταν ίδιες ή μεγαλύτερες από αυτές για άλλα αρδευτικά συστήματα στις περισσότερες των περιπτώσεων. Η απόδοση με χρήση ΥΣΑ ήταν 12 έως 14% μεγαλύτερη από ότι με αυλάκια και καταιονισμό για το γλυκό καλαμπόκι (Phene and Beale, 1976). Ίδιες αποδόσεις αναφέρονται για πεπόνια, κρεμμύδια και καρότα στην Αριζόνα (Bucks et al., 1981) και γλυκό καλαμπόκι στο Τέξας (Wendt et al., 1977). Στην Αριζόνα, η ΥΣΑ έδωσε 35% μεγαλύτερες αποδόσεις στα λάχανα από ότι τα αυλάκια και ~35% μεγαλύτερη παραγωγή στα κολοκυθάκια από ότι η άρδευση με αυλάκια και η επιφανειακή στάγδην (Rubeiz et al., 1989). Παρά ταύτα, η προσθήκη λιπασμάτων στην άρδευση με αυλάκια έδωσε παραγωγές στα λάχανα και κολοκυθάκια ίσες με αυτές της ΥΣΑ. Οι Clark et al. (1991) αναφέρουν ίδιες αποδόσεις τομάτας για ΥΣΑ και υπάρδευση στη Φλόριδα.

Συγκρινόμενη με την ΕΣΑ, η ΥΣΑ είχε καλύτερες αποδόσεις βαμβακιού (Αλεξίου κ.α., 2003, Kalfountzos et al., 2004), γλυκού καλαμποκιού στο Ισραήλ και την Καλιφόρνια (Bar-Yosef et al., 1989), πατάτας σε μια περιοχή του Νέου Μεξικού, αλλά όχι σε κάποια άλλη (Sammis, 1980) και τομάτας στην Καλιφόρνια (Phene et al., 1987). Ίδιες αποδόσεις αναφέρονται για πεπόνια, κρεμμύδια και καρότα στην Αριζόνα (Bucks et al.,

1981), για πράσινα φασόλια και μπρόκολα στην Νότια Καρολίνα (Camp et al., 1993), για τομάτα στην Καλιφόρνια (Hutmacher et al., 1985), για αρακά και αχλάδια στο Ισραήλ (Oron et al., 1995, 2002), για μαρούλι στο Νέο Μεξικό (Sammis, 1980) και για τομάτα και αγγούρι στην Αίγυπτο (El-Gindy and El-Araby, 1996). Η παραγωγή πατάτας ήταν μεγαλύτερη με υπόγεια στάγδην από ότι με καταιονισμό στην Καλιφόρνια (DeTar et al., 1996) και ίδια ή ελαφρώς μεγαλύτερη στο Αϊντάχο με αυτοκινούμενο αρδευτή (Neibling and Brooks, 1995), αλλά η υπόγεια στάγδην απαιτήσε μόνον 50% έως 70% του νερού. Οι Batchelor et al. (1990) δεν διαπίστωσαν διαφορά στην απόδοση ζαχαροκάλαμου σε σχέση με την ισαποχή των γραμμών των φυτών αλλά η τοποθέτηση του αγωγού εφαρμογής σε βάθος 0,2 m έδωσε καλύτερα παραγωγικά χαρακτηριστικά σε σχέση με την επιφανειακή τοποθέτηση.

Οι Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.α., 2000, 2007β και Sakellariou – Makrantonaki et al. (2001, 2002a,b), αναφέρουν αύξηση της υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων και αύξηση του βάρους ριζών και του ζαχαρικού τίτλου κάτω από συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την επιφανειακή. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, είναι έως τώρα η μοναδική διαθέσιμη πηγή πληροφόρησης για την εφαρμογή της ΥΣΑ σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων.

2.5.5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας μια προσομοίωση, ο Bosch et al. (1992) βρήκε την ΥΣΑ πιο προσοδοφόρα για το καλαμπόκι και τη σόγια στη Βιρτζίνια, μόνο για μικρές περιοχές (< 30 ha) συγκρινόμενη με αυτοκινούμενους περιστροφικούς αρδευτές (center pivots). Σε μια οικονομική ανάλυση για το καλαμπόκι στο Κάνσας, ο Dhuyvetter et al. (1995) αναφέρει μια χαμηλότερη πρόσοδο για την ΥΣΑ απ' ότι για ένα σύστημα περιστροφικού αρδευτή, βασιζόμενος στην διάρκεια ζωής των συστημάτων και στην απόδοση του αραβοσίτου. Σε μια μελέτη ενός αγρού 195 ha στο δυτικό Τέξας, όπου μετέτρεψαν την μέθοδο άρδευσης από αυλάκια σε ΥΣΑ, σε μία περίοδο οκτώ ετών, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, οι Henggeler et al. (1996) αναφέρουν αυξημένη οικονομική αποδοτικότητα της ΥΣΑ για το βαμβάκι λόγω της υψηλότερης παραγωγής και της διανομής των σταθερών δαπανών σε μια μεγαλύτερη περιοχή. Οι Romero et al. (2006) σύγκριναν την οικονομική αποδοτικότητα άρδευσης αμυγδαλεώνα στη Νότια Ισπανία και κατέληξαν στο ότι η εφαρμογή με ΥΣΑ 20% της ET_c κατά την καρπόδεση και

50% ET_c μετά τη συγκομιδή, αποδείχθηκαν οικονομικά αποδοτικότερες από την εφαρμογή του 100% ET_c με ΥΣΑ και ΕΣΑ.

Ο Knapp (1993) συμπέρανε ότι οι γενικές συστάσεις σχετικά με το καλύτερο σύστημα άρδευσης δεν είναι κατάλληλες αλλά εξαρτώνται από πολλούς φυσικούς, βιολογικούς και οικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα μέσω της ανάπτυξης και της χρήσης προγραμμάτων και βάσεων δεδομένων κατάλληλων για την περιοχή. Ένας άλλος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην οικονομική αποδοτικότητα της άρδευσης είναι οι υδάτινοι πόροι, η διαθεσιμότητα τους και το κόστος τους με το χρόνο. Ο ανταγωνισμός για τους υδάτινους πόρους αυξάνεται με συνέπεια, ειδικά στις ξηρές περιοχές, δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί ακριβώς η μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα και το κόστος. Ως εκ τούτου, οι οικονομικές αναλύσεις είναι πολύ δύσκολες, τουλάχιστον για μακρά χρονικά διαστήματα. Αντιθέτως, η ελαττούμενη διαθεσιμότητα νερού για τη γεωργία, απαιτεί την αυξημένη αποδοτικότητα διατήρησης και εφαρμογής του νερού, η οποία μπορεί να αυξήσει την οικονομική σημαντικότητα των συστημάτων ΥΣΑ.

Αν και διάφορες εργασίες πραγματεύονται την πιθανή μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της άρδευσης με τη χρήση της ΥΣΑ, καμία δεν αναφέρει μετρήσεις που να υποστηρίζουν αυτό το συμπέρασμα. Η τεχνική διαχείρισης μικρών, συχνών, εφαρμογών άρδευσης καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μειώνει το ενδεχόμενο για απορροή και έκπλυση κάτω από το ριζόστρωμα, ειδικά σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι ικανές να προκαλέσουν απορροή και έκπλυση. Οι Lamn et al. (1995a) εκτίμησαν απώλειες από βαθιά διήθηση σε πείραμά τους στο Κάνσας (δεν υπολόγισαν την απορροή) και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επιφανειακή απορροή και η βαθιά διήθηση θα μπορούσαν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση συστημάτων ΥΣΑ. Μέσω της χρήσης κανονικοποιημένων δεδομένων, χωρικών αναλύσεων και ενός ισοζυγίου αζώτου σε καλλιέργεια καρπουζιού στην Αριζόνα, οι Pier and Doerge (1995) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέγιστη απόδοση θα μπορούσε να ληφθεί διατηρώντας τα υπολογισμένα NO₃-N στο νερό που απομακρύνεται από το ριζόστρωμα. Οι Felsot et al. (2000) αναφέρουν πως η κίνηση imidacloprid περιορίστηκε στα πρώτα 90 cm του εδάφους, παρά την ημερήσια άρδευση και πως η κίνηση ήταν περισσότερο περιορισμένη όταν η άρδευση εφαρμοζόταν βάση μετρήσεων υγρασίας παρά με ημερήσιο προγραμματισμό. Ενώ

είναι περιορισμένα, τα διαθέσιμα στοιχεία γενικά στηρίζουν τον ισχυρισμό ότι η ΥΣΑ μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αρδευόμενης γεωργίας.

2.5.6. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Αν και μερικά μειονεκτήματα της μεθόδου έχουν ήδη αναφερθεί, μια περίληψη αυτών μπορεί να είναι χρήσιμη. Ο Burt (1995) αναφέρει μερικούς περιορισμούς και διάφορες ανησυχίες καλλιεργητών για την ΥΣΑ. Ίσως το μεγαλύτερο πρόβλημα, είτε πραγματικά είτε φαινομενικά, είναι το ότι το μεγαλύτερο μέρος του συστήματος άρδευσης θάβεται κάτω από την εδαφική επιφάνεια, καθιστώντας την άμεση παρατήρηση της ροής του νερού από τους μεμονωμένους σταλάκτες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αδύνατη. Επιπλέον, αυτό κάνει την αξιολόγηση της λειτουργίας συστημάτων και τη μέτρηση της ομοιομορφίας συστημάτων πολύ δύσκολη.

Όταν απαιτούνται επισκευές των συστημάτων, απαιτείται γενικά περισσότερος χρόνος και το κόστος είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι για τα επιφανειακά συστήματα. Εάν χρειάζεται άρδευση για το φυτόρωμα, η ΥΣΑ μπορεί να μην είναι το προτιμώμενο σύστημα άρδευσης, ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τις συνθήκες του αγρού. Η έκπλυση των δευτερευόντων αγωγών συστήνεται γενικά για τα συστήματα ΥΣΑ για να διευκολύνουν την έκπλυση του συστήματος, η οποία χρειάζεται για να απομακρύνονται τα συσσωρευμένα μόρια που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την έμφραξη των σταλακτών. Η εγκατάσταση βαλβίδων ανακούφισης συστήνεται συχνά για να μειώσει τις αρνητικές πιέσεις στους αγωγούς εφαρμογής κατά τη διάρκεια της στράγγισης του συστήματος, η οποία μπορεί να προκαλέσει την εισχώρηση εδαφικών τεμαχιδίων μέσα στους σταλάκτες υπό κάποιες συνθήκες (Vyrilas et al., 2004).

Η έκπλυση του συστήματος και το καλό φιλτράρισμα του νερού είναι σημαντικά για τη μακροζωία των συστημάτων. Πολλές από αυτές τις απαιτήσεις του σχεδιασμού και διαχείρισης των συστημάτων αυξάνουν το κόστος αυτών, το οποίο μπορεί να μειώσει την οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης ΥΣΑ σε μερικές περιπτώσεις. Τέλος, σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να διαμορφωθούν συμπιεσμένες εδαφικές στρώσεις σε μικρό βάθος επειδή η άροση είτε άλλαξε είτε καταργήθηκε. Η δημιουργία τέτοιων συνθηκών μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση των καλλιεργειών.

2.6. Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΩΝ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

2.6.1. ΚΑΤΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ

Το γένος Beta, στο οποίο ανήκουν και τα τεύτλα, θεωρείται ότι κατάγεται από την Δυτική Ασία, ιδιαίτερα από την Μικρά Ασία και την περιοχή του Καυκάσου. Από εκεί τα διάφορα είδη επεκτάθηκαν στην Ευρώπη και Ασία σε βόρειο γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 35° - 60°. Το συγγενές προς το καλλιεργούμενο είδος Beta maritima, αυτοφύεται και στην Ελλάδα. Το ζαχαρότευτλο (Beta vulgaris) είναι μέλος της οικογένειας των Chenopodiaceae, και όπως και πολλά άλλα είδη της οικογένειας αυτής είναι αλόφυτο. Είναι διετές φυτό αλλά για την παραγωγή ζάχαρης η συγκομιδή γίνεται το πρώτο έτος.

Η καλλιέργεια των ζαχαρότευτλων επεκτείνεται στις περιοχές της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας και αποτελεί το 5% περίπου της καλλιεργούμενης γεωργικής έκτασης στην περιοχή αυτή.

2.6.2. ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ: ΕΔΑΦΟΣ–ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ–ΥΓΡΑΣΙΑ–ΦΩΣ

Η καλλιέργεια αναπτύσσεται σε ευρύ φάσμα εδαφών με προτίμηση στα ελαφρά και καλά στραγγιζόμενα εδάφη. Η συμπίεση του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό της ανάπτυξης της ρίζας και συνεπώς σε μειωμένη παραγωγή. Οι τιμές pH μικρότερες από 5,5 είναι δυσμενείς για την ανάπτυξη του φυτού.

Η θερμοκρασία, στην οποία δύναται να αρχίσει η διαδικασία της βλάστησης του σπόρου, είναι 3–4 °C, ενώ σε θερμοκρασία 15–25 °C το φυτό ολοκληρώνεται σε 3–4 ημέρες. Τα νεαρά φυτά υφίστανται ζημιές σε θερμοκρασίες από -3 °C έως - 4 °C, ενώ αφού αποκτήσουν τα πρώτα μόνιμα φύλλα, αντέχουν έως τους -8 °C. Η άριστη θερμοκρασία για την φωτοσύνθεση και συνεπώς για την αποθήκευση ζαχαρόζης είναι 19–22 °C. Το ζαχαρότευτλο ευνοείται από μέση ένταση φωτός. Είναι απαιτητικό φυτό ως προς την υγρασία, κυρίως κατά το μέσο της περιόδου αναπτύξεώς του. Συνεπώς, σε ξηροθερμικά περιβάλλοντα η καλλιέργεια απαιτεί άρδευση.

2.6.3. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

Λίπανση

Το άζωτο είναι το σπουδαιότερο στοιχείο που επηρεάζει την παραγωγή του ζαχαρότευτλου. Η έλλειψή του προκαλεί δραματική μείωση του βάρους ριζών ενώ αντίθετα, η μεγάλη ποσότητα μειώνει τον ζαχαρικό τίτλο και την καθαρότητα του χυμού. Γενικά υπολογίζεται ότι η καλλιέργεια πρέπει να προσλάβει 20–25 Kg/στρ. N για να

δώσει την μέγιστη παραγωγή στρεμματοζαχάρου. Για τα ελληνικά εδάφη η μέση άριστη δόση λίπανσης είναι: 12 – 14 Kg /στρ. N, 9 – 11 kg / στρ. P₂O₅ και 0 – 45 kg / στρ. K₂O.

Τα στοιχεία θείο, ασβέστιο και μαγνήσιο θεωρούνται δευτερεύοντα θρεπτικά, ενώ οι ανάγκες σε ιχνοστοιχεία αντιμετωπίζονται επαρκώς στα περισσότερα ελληνικά εδάφη εκτός του βορίου και μαγνησίου, που σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται προσθήκη είτε με διαφυλλικούς ψεκασμούς, είτε με λιπάσματα.

Σπορά

Η σπορά κάτω από τις ελληνικές συνθήκες πραγματοποιείται από τα μέσα Φεβρουαρίου έως και τα τέλη Μαρτίου. Το βάθος σποράς είναι 1-3 cm ανάλογα με την εποχή σποράς (πρώιμη ή όψιμη) και την κατάσταση του αγρού. Η απόσταση σποράς μεταξύ των γραμμών έχει καθιερωθεί στα 50 cm. Στόχος είναι το φύτευμα 8000 – 11000 φυτών/στρ., ομοιόμορφα κατανεμημένα, ώστε με τις απώλειες μέχρι το φθινόπωρο να συγκομιστούν 7000 – 10000 φυτά/στρ.

Ζιζανιοκτονία

Τα ζιζάνια στην τευτλοκαλλιέργεια δημιουργούν πολλά προβλήματα. Η αντιμετώπισή τους θεωρείται υποχρεωτική καλλιεργητική εργασία, αφού η παρουσία τους δημιουργεί σοβαρές επιπτώσεις στην παραγωγή άμεσα με τον ανταγωνισμό σε θρεπτικά στοιχεία, φως, νερό αλλά και διαθέσιμο χώρο και έμμεσα εμποδίζοντας την σωστή εκτέλεση αρκετών καλλιεργητικών εργασιών, όπως αρδεύσεις, ψεκασμούς, συγκομιδή. Επίσης, όχι σπάνια, αποτελούν ξενιστές και φορείς εχθρών και ασθενειών. Τα μέτρα που λαμβάνονται για την αντιμετώπισή τους είναι είτε προληπτικά (αμειψισπορά, θερινά οργώματα κ.ά.), είτε καταστροφή με μηχανικά μέσα και χημική καταπολέμηση.

Συγκομιδή

Η συγκομιδή στην Ελλάδα ξεκινά περίπου στα μέσα Αυγούστου και τελειώνει αρχές Δεκεμβρίου. Ο χρόνος έναρξης προσδιορίζεται από την βιομηχανική ωρίμανση των φυτών, την καταλληλότητα δηλαδή των τεύτλων από άποψη αποδόσεων και ποιότητας. Καθορίζεται από την κατάσταση της φυτείας (ασθένειες, έλλειψη νερού, κίνδυνος αναβλάστησης), την κατάσταση του αγρού (δυσκολία συγκομιδής μετά από βροχές), την κατάσταση θρέψης (εκτίμηση της προοπτικής που έχει η φυτεία να αυξήσει την παραγωγή της).

2.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΑ

Οι άγριοι πρόγονοι του ζαχαροτεύτλου εξελίχθηκαν σε παράκτιες περιοχές, δεδομένο που αποτελεί την αιτία για την δυνατότητα της καλλιέργειας να επιζεί και να αναπτύσσεται σε συνθήκες αλατότητας και ξηρασίας καλύτερα από τις περισσότερες μεγάλες καλλιέργειες. Όσον αφορά την αλατότητα, μόνο το βαμβάκι και το κριθάρι είναι πιο ανθεκτικά. Οι ιδιότητες του ζαχαροτεύτλου που του δίδουν την ανθεκτικότητα στην αλατότητα και την ξηρασία είναι η μακρά βλαστική περίοδος που δεν παρουσιάζει ευαισθησίες κατά το στάδιο ανθοφορίας, το βαθύ ριζικό σύστημα της καλλιέργειας και η ικανότητά της να ρυθμίζει την ώσμωση. Το ζαχαρότευτλο επηρεάζεται αρνητικά από την κατάκλιση αλλά μπορεί να ανεχτεί μια υπόγεια στάθμη νερού περίπου ενός μέτρου. Μόλις η καλλιέργεια φυτρώσει, δεν βλάπτεται άμεσα από μεγάλους ύψους βροχές ή αρδεύσεις. Παρόλα αυτά, οι υγρές συνθήκες, επιδεινώνουν μερικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων των διάφορων ασθενειών, της έκπλυσης του διαθέσιμου αζώτου και των δυσκολιών στην μηχανική συγκομιδή (Dunham, 1993).

Η καλλιέργεια στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της απαιτεί πολύ λίγο νερό. Σχεδόν όλο το νερό που χρησιμοποιείται από την καλλιέργεια λαμβάνεται μέσω των ινώδων ριζών. Η πρόσληψη από το έδαφος αρχίζει στην ημέρα αλλά συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας έως ότου επανυδατωθεί το φυτό. Καθώς η βλαστική περίοδος προχωρά, το νερό λαμβάνεται από σταδιακά μεγαλύτερα βάθη.

Σύμφωνα με τον Dunham (1993), περίπου το 1/5 από τα 80 εκατομμύρια στρέμματα που καλλιεργούνται παγκοσμίως με ζαχαρότευτλα δέχονται άρδευση, αλλά το κλάσμα αυτό ποικίλει ανάλογα με την περιοχή. Στις Η.Π.Α., ανατολική Μεσόγειο, Μέση Ανατολή (κυρίως στο Ιράν) και στη Χιλή το 80 – 100 % της καλλιεργούμενης έκτασης αρδεύεται. Στη Δυτική Ευρώπη αρδεύεται το 20 – 80 % της καλλιέργειας, ενώ στη βόρεια Ευρώπη, την πρώην Ε.Σ.Σ.Δ., τη Κίνα και την Ιαπωνία αρδεύεται λιγότερο από το 20 % της καλλιεργούμενης έκτασης.

2.7.1. ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη της καλλιέργειας όπως εκφράζεται ως παραγωγή ξηρής ουσίας συσχετίζεται πολύ με την ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται ως διαπνοή. Προτού η ρίζα αυξηθεί, το ινώδες ριζικό σύστημα μπορεί να αντιπροσωπεύει τουλάχιστον το 0,3 της συνολικής ξηρής ουσίας αλλά μειώνεται σε περίπου 0,05 κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της καλλιέργειας (Fick et al., 1975, Brown and Biscoe, 1985,

Brown et al., 1987, Yamaguchi and Tanaka, 1990). Η έλλειψη νερού εμφανίζεται να επιταχύνει αυτήν την μείωση (Brown et al., 1987), αλλά αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι πολλές από τις λεπτότερες ρίζες νεκρώνονται όταν ξηραίνεται η εδαφική επιφάνεια. Στην πραγματικότητα, δεν είναι ποτέ δυνατό να μετρηθούν όλες οι ινώδεις ρίζες διότι χάνεται υλικό από αυτές κατά την καλλιεργητική περίοδο. Τέτοιες μετρήσεις όπως γίνονται για το ζαχαρότευτλο αναμφισβήτητα υποτιμούν το κλάσμα της συνολικής ξηρής ουσίας της καλλιέργειας που προέρχεται από το ριζικό σύστημα (Brown et al., 1987).

Μόλις αρχίσει να αυξάνεται η ρίζα, ένα μεγάλο μερίδιο της ξηρής ουσίας οφείλεται σε αυτήν. Κατά την συγκομιδή, ο λόγος της ρίζας προς στη συνολική ξηρή ουσία κυμαίνεται συνήθως στο εύρος 0,65 έως 0,75. Η επίδραση της έλλειψης νερού σε αυτόν τον λόγο δεν είναι ξεκάθαρη. Σε πειράματα του Ghariani (1981), η υδατική καταπόνηση εμφανίστηκε να αυξάνει την αναλογία της ρίζας στη συνολική ξηρή ουσία, δείχνοντας ότι η καταπόνηση περιορίζει την αύξηση της κορυφής περισσότερο από την αύξηση της ρίζας. Οι Hang and Miller (1986b) από την άλλη πλευρά, διαπίστωσαν ότι ο λόγος ρίζα/συνολική ξηρή ουσία μειώθηκε όταν οι καλλιέργειες ήταν είτε ανεπαρκώς είτε υπερβολικά αρδευμένες. Αυτά τα αντιφατικά αποτελέσματα μπορεί να οφείλονται εν μέρει στις απροσδιόριστες απώλειες ξηρής ουσίας υπό μορφή νεκρών φύλλων. Αυτή η επίδραση, όπως η δυσκολία να μετρηθούν όλες οι ινώδεις ρίζες, είναι πιθανό να συνεχίσει να περιπλέκει τις προσπάθειες να γίνει κατανοητό πώς οι διαφορετικές μεταχειρίσεις νερού επιδρούν στον καταμερισμό της ξηρής ουσίας.

Ο λόγος της ζάχαρης προς στη συνολική ξηρή ουσία μέσα στη ρίζα φθάνει σύντομα σε μια σταθερή τιμή και έκτοτε μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς η ρίζα αυξάνεται. Στις σύγχρονες ποικιλίες η τιμή είναι κοντά στο 0,75. Η θρέψη επιδρά στον λόγο αυτό ελαφρώς, αλλά η υδατική καταπόνηση δεν έχει καμία σημαντική επίδραση (Ghariani, 1981, Brown et al., 1987).

2.7.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

Οι ποσότητες νερού άρδευσης που δίνονται στην καλλιέργεια των ζαχαροτεύτλων ποικίλλουν πολύ παγκοσμίως. Στην Αγγλία και τη Γαλλία, η άρδευση είναι συμπληρωματική των βροχοπτώσεων και είναι χαρακτηριστικό πως απαιτούνται μόνον 100-200 mm νερού για να εξασφαλίσουν ότι η ανάπτυξη δεν θα περιορισθεί από την έλλειψη νερού. Στο άλλο άκρο, είναι οι θερμές, ξηρές περιοχές, όπως οι ΗΠΑ, περιοχές

της Μεσογείου και το Πακιστάν, όπου η παραγωγή ζαχαροτευτλων δεν μπορεί να συντελεσθεί χωρίς άρδευση. Σε αυτές τις περιοχές εφαρμόζονται συνήθως 500-1000 mm νερού (Dunham, 1993). Η οικονομική ωφελιμότητα της αρδευόμενης καλλιέργειας των ζαχαρότευτλων εξαρτάται όχι μόνο από το κόστος της άρδευσης αλλά και την τιμή που πληρώνεται η παραγωγή των τεύτλων και των υποπροϊόντων τους.

Παραγωγή ζάχαρης

Κατά την μελέτη του οφέλους της άρδευσης στα ζαχαρότευτλα, το βασικότερο ζήτημα είναι η επίδρασή της στα οικονομικά συστατικά της παραγωγής, δηλαδή των ριζών και ιδιαίτερα της ζάχαρης.

Πολλά πειράματα αγρού έχουν εκτελεσθεί προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν την επίδραση της άρδευσης, σε πολλές τευτλοπαραγωγικές περιοχές. Διάφορες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί και πολλά από τα πειράματα έδωσαν πληροφορίες για την ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας σε σχέση με την υδατοκατανάλωση. Όπου η άρδευση είναι συμπληρωματική, η σχέση νερού-παραγωγής γενικά βελτιώνεται με την μείωση των εποχιακών βροχοπτώσεων. Οι Robelin and Mingeau (1970) και οι Draycott and Messem (1977) δίνουν παραδείγματα. Ένα καλύτερο μέτρο από τις εποχιακές βροχοπτώσεις είναι το μέγιστο πιθανό έλλειμμα υγρασίας που υπολογίζεται από ένα απλό υδατικό ισοζύγιο. Ο Penman (1970) έδειξε ότι πέρα από ένα ορισμένο σημείο, η σχετική παραγωγή (δηλ. παραγωγή χωρίς άρδευση προς αυτήν με πλήρη άρδευση) μειώθηκε γραμμικά σε σχέση με το μέγιστο πιθανό έλλειμμα.

Όπου η άρδευση κυριαρχεί, είναι λογικό να συσχετίζεται η παραγωγή με την ποσότητα του νερού άρδευσης που εφαρμόσθηκε. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την συσχέτιση αυτή είναι γνωστές ως σχέσεις νερού-παραγωγής. Επειδή οι σχέσεις νερού-παραγωγής είναι πιο προβλέψιμες απ' ό τι στις περιοχές που η άρδευση είναι συμπληρωματική, οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό για βέλτιστη χρήση νερού σε μεμονωμένους αγρούς ή μεγάλες περιοχές. Οι σχέσεις παραγωγής συχνά περιλαμβάνουν περισσότερους του ενός παράγοντες που περιορίζουν την παραγωγή, συνήθως το νερό και το άζωτο (Hexem and Heady, 1978).

Οι Amaducci et al. (1978) μελέτησαν την επίδραση της άρδευσης με καταιονισμό στα ζαχαρότευτλα σε περιοχές της Ιταλίας και κατέληξαν πως η άρδευση μείωσε τον ζαχαρικό τίτλο, αλλά αύξησε πολύ περισσότερο την παραγωγή ριζών με

τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής ζάχαρης. Οι Musik and Dusek (1982) αναφέρουν πως η έλλειψη νερού σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας της παραγωγικότητας των ζαχαροτεύτλων.

Κατά τους Mambelli et al. (1992) η άρδευση των ζαχαροτεύτλων επέδρασε αυξητικά στο βάρος ριζών που διέφερε αναλόγως του σταδίου. Σε σχέση με τον μάρτυρα, η άυξηση του βάρους των ριζών κυμάνθηκε από 39 έως 61% κατά την περίοδο από τέλη Αυγούστου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου. Όμως, η άρδευση είχε ως συνέπεια την μείωση του ζαχαρικού τίτλου κατά δύο μονάδες κατά μέσο όρο. Η έλλειψη νερού κατά την φάση της ανάπτυξης του φυλλώματος είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης σε ρίζες και ζάχαρη, μείωση η οποία ήταν υψηλότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στην φάση ανάπτυξης του ριζικού συστήματος (Bazza, 1993).

Οι Fabeiro et al., (2003) μελετώντας την δυνατότητα εξοικονόμησης νερού στην περιοχή Albacete της Ισπανίας, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ανάλογες με αυτές των περιοχών τευτλοκαλλιέργειας στην Ελλάδα, αναφέρουν ότι, όταν ο περιορισμός νερού ήταν μέσος στο πρώτο στάδιο ανάπτυξης, μέτριος στο στάδιο διόγκωσης της ρίζας και αυστηρός στο στάδιο της ωρίμανσης, οι παραγωγές ήταν υψηλές.

Συγκέντρωση ζάχαρης στις ρίζες

Η συγκέντρωση ζάχαρης στις καλά αρδευόμενες καλλιέργειες αυξάνεται σταθερά κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, φθάνοντας πριν από τη συγκομιδή σε μια μέγιστη τιμή 15-18% (g ζάχαρης ανά 100 g νωπής ρίζας). Στα τεύτλα που έχουν υποστεί υδατική καταπόνηση, η συγκέντρωση ζάχαρης αυξάνεται ταχύτερα και, κάτω από σφοδρή καταπόνηση, μπορεί να είναι 5% υψηλότερη (π.χ. 20% παρά 15%) απ' ό τι στις μη καταπονημένες καλλιέργειες (Hang and Miller, 1986a). Αντιθέτως, ένα ευρύ φάσμα των μεταχειρίσεων άρδευσης έδειξε μικρή επίδραση στη συγκέντρωση ζάχαρης κατά την συγκομιδή (Ehlig and LeMert, 1979, Winter, 1988). Αυτό πιθανόν οφείλεται στις αυξανόμενες ποσότητες ακαθαρσιών στις ρίζες των καταπονημένων ζαχαροτεύτλων. Παρόλα αυτά, μια βασική αιτία είναι οι πιθανές βροχοπτώσεις στο τελευταίο στάδιο της βλαστικής περιόδου που επανυδατώνουν τις ρίζες των καταπονημένων τεύτλων, μειώνοντας κατά συνέπεια τη συγκέντρωση ζάχαρης. Αυτό υποστηρίχθηκε από τον Νυκον (1977) ο οποίος σχημάτισε εξισώσεις συσχέτισης της συγκέντρωσης ζάχαρης με τις βροχοπτώσεις του Σεπτεμβρίου για διάφορες τευτλοπαραγωγικές περιοχές στην Ευρώπη.

Σε πειράματα της E.B.Z. (1981), παρατηρήθηκε ότι γενικώς η άρδευση επέφερε μεγάλη αύξηση της παραγωγής ριζών και μείωση του ζαχαρικού τίτλου. Στο μέτρο που η αύξηση της παραγωγής ριζών συνοδεύεται από μείωση του ζαχαρικού τίτλου, η επίδραση της άρδευσης οφειλόταν σε απλή ενυδάτωση των ριζών. Οι Hills et al. (1990) παρατήρησαν ότι η παραγωγή ζάχαρης εξαρτάται από τον χρόνο συσσώρευσης αποθησαυριστικών ουσιών κατά την ανάπτυξη της ρίζας. Καθώς αυξάνεται το ριζικό σύστημα, υπάρχει ένας σταθερός καταμερισμός ζάχαρης στις ρίζες και έτσι η απόδοση σε ζάχαρη αυξάνει καθ' όλη την αυξητική περίοδο. Η αύξηση της συγκέντρωσης ζάχαρης στις ρίζες, αυξανόμενης της έλλειψης εδαφικής υγρασίας, οφείλεται στην βραδύτερη συσσώρευση νερού παρά στην ταχεία αποθήκευση ζάχαρης.

Πρόσληψη θρεπτικών και μελασσογόνα

Το νερό που παρέχεται με την άρδευση μπορεί να αποτρέψει τις λεπτές ρίζες από τη νέκρωση στο ξηρό έδαφος, να βοηθήσει τα θρεπτικά ιόντα να κινηθούν προς τις ρίζες με διάχυση και να αυξήσει τη αποδόμηση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Από την άλλη, η άρδευση μπορεί να οδηγήσει στην έκπλυση των θρεπτικών, ειδικότερα του αζώτου, πέρα από το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος. Γενικά, με την άρδευση αυξάνεται η πρόσληψη θρεπτικών, αλλά δεν αυξάνεται απαραίτητως η συγκέντρωσή τους στα φυτά (Dunham, 1993).

Τα πειράματα αγρού στα ζαχαρότευτλα δεν έχουν παράγει πολλά στοιχεία για την σημαντικότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της άρδευσης και των λιπασμάτων εκτός από την περίπτωση του αζώτου, για το οποίο έχουν καταγραφεί δύο μορφές αλληλεπιδράσεων. Πρώτον, όταν το άζωτο περιορίζεται, η άρδευση αυξάνει μερικές φορές την απόδοση της καλλιέργειας σε μέτριες δόσεις λιπάσματος αζώτου (Last et al., 1983). Δεύτερον, όταν ο ανεφοδιασμός αζώτου είναι άφθονος, η άρδευση μπορεί να μετριάσει τα δυσμενή αποτελέσματα της υπερβολικής εφαρμογής αζώτου με τη μείωση της συγκέντρωσης του α-amino αζώτου στις ρίζες (Haddock et al., 1974, Last et al., 1983, Winter, 1990). Το κάλιο και το νάτριο στις ρίζες θεωρούνται επίσης ως ακαθαρσίες επειδή παρεμποδίζουν την εκχύλιση ζάχαρης. Αντίθετα από τις μειώσεις των ενώσεων α-amino αζώτου, η άρδευση έχει μόνο μικρή, ασαφή επίδραση στις συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων (Vukov, 1977, Last et al, 1983, Winter, 1990).

2.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, διενεργήθηκε μια ανασκόπηση δημοσιευμένων εργασιών για την υπόγεια στάγδην άρδευση προκειμένου να προσδιοριστεί η υπάρχουσα κατάσταση στο αντικείμενο καθώς επίσης και μια ανασκόπηση εργασιών που παρέχουν πληροφορίες για την καλλιέργεια των ζαχαροτεύλων και κυρίως για την επίδραση της άρδευσης στα παραγωγικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

Στην ανασκόπηση περιελήφθησαν πληροφορίες για την επίδραση της ΥΣΑ στην απόδοση περισσότερων από 30 καλλιεργειών, σε σύγκριση μεταξύ ΥΣΑ και άλλων μεθόδων, σε σχέση με το βάθος τοποθέτησης του αγωγού εφαρμογής, την ισαποχή των αγωγών εφαρμογής ή τις μεθόδους διαχείρισης της άρδευσης.

Σχετικά με τις καλλιέργειες, οι περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο βαμβάκι και το καλαμπόκι σε σχέση με άλλες μεγάλες καλλιέργειες, πιθανόν εξαιτίας της οικονομικής τους σημασίας. Άλλες καλλιέργειες, περιλαμβανομένων του σακχαροκάλαμου, φιστικιού, σιταριού, σόργου, μηδικής και χλοοτάπητα έχουν αποσπάσει πολύ λιγότερη προσοχή. Πολλές πληροφορίες αναφέρονται στην τομάτα (τόσο στην βιομηχανική όσο και στην επιτραπέζια), περισσότερες από ότι για κάθε άλλη καλλιέργεια λαχανικών.

Ελάχιστες είναι οι εργασίες που πραγματεύονται την χρήση στάγδην άρδευσης στα ζαχαρότευτλα ενώ, η μοναδική καταγεγραμμένη εμπειρία στην άρδευση ζαχαροτεύλων με υπόγεια στάγδην άρδευση είναι η ερευνητική δραστηριότητα του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στην ανασκόπηση αναφέρθηκαν εργασίες οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικές με τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και την διαχείριση των συστημάτων ΥΣΑ. Ένας σημαντικός κορμός πληροφοριών είναι διαθέσιμος για να βοηθήσει τον προσδιορισμό σχετικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων αυτής της τεχνολογίας σε σύγκριση με άλλες αρδευτικές μεθόδους και συστήματα. Γενικώς, η υπόγεια στάγδην παρουσιάζεται ως ένα ιδιαιτέρως αποδοτικό σύστημα. Ζητήματα ωφελιμότητας και οικονομικών της ΥΣΑ δεν έχουν προσδιορισθεί με σαφήνεια και εξαρτώνται κυρίως από τις τοπικές συνθήκες και περιορισμούς.

Υλικά και Μέθοδοι Α. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη διερεύνηση επίδρασης της άρδευσης με επιφανειακή και υπόγεια άρδευση με σταγόνα στην ανάπτυξη και απόδοση των ετήσιων καλλιεργειών, επιλέχθηκε η καλλιέργεια των ζαχαροτεύτλων διότι διεθνώς δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία. Σχεδιάσθηκαν και εγκαταστάθηκαν συστήματα υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Έγιναν μετρήσεις και δειγματοληψίες φυτικού υλικού σε πειραματικό αγρό για τρία συνεχή έτη.

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον σχεδιασμό του πειράματος και στις παραμέτρους και μεταβλητές που είναι απαραίτητες να μετρηθούν στον πειραματικό αγρό, για την αξιολόγηση της άρδευσης. Περιγράφονται με λεπτομέρεια τα πειράματα από τα οποία προέρχονται οι μετρήσεις των παραμέτρων και των μεταβλητών αυτών. Επίσης περιγράφονται τα συστήματα και οι τεχνικές άρδευσης των πειραματικών τεμαχίων. Γίνεται λεπτομερής αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους, της εδαφικής υγρασίας και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

3.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, κατά τις καλλιεργητικές περιόδους των ετών 2003, 2004 και 2005. Η έκταση του πειραματικού αγρού είναι επίπεδη με υψόμετρο 70 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και γεωγραφικές συντεταγμένες 39° 23' Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος και 22° 45' Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος.

3.2.1. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ**Φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους**

Το έδαφος στη θέση του πειραματικού αγρού ταξινομείται ως Typic Xerochrepts. Τα εδάφη αυτά ανήκουν στην τάξη των Inceptisols. Το έδαφος έχει υφή αμμοαργιλοπηλώδη έως αργιλώδη και κοκκομετρική σύσταση μετρίως λεπτόκοκη έως λεπτόκοκη. Η κατάσταση υδρομορφίας είναι καλή με Β βαθμό αποστράγγισης και βελτιώνεται με το βάθος του εδάφους εξ αιτίας της πετρώδους σύστασής του. Έχει πολύ καλά αναπτυγμένο πορώδες αποτελούμενο κυρίως από μικρού και μέσου μεγέθους πόρους (Μήτσιος κ.ά., 2000).

Η κατατομή του εδάφους και μέχρι το βάθος του 1,2 m περίπου, παρουσιάζει τέσσερις στρώσεις που δεν διαφέρουν ιδιαίτερα ως προς τη μηχανική τους σύσταση. Η μηχανική ανάλυση δειγμάτων του εδάφους που εκτελέστηκε στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. στη Λάρισα, έδειξε ότι η επιφανειακή στρώση χαρακτηρίζεται από μηχανική σύσταση αργιλοπηλώδη, όπως και η δεύτερη και τρίτη στρώση. Τέλος, το έδαφος στην τέταρτη στρώση χαρακτηρίζεται ως αμμοαργιλοπηλώδες. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται τα βάθη των στρώσεων και ο εδαφικός τύπος.

Σε θέση του αγρού όπου εγκαταστάθηκε το πείραμα διανοίχθηκε εδαφοτομή προκειμένου να προσδιορισθούν και μελετηθούν οι ιδιότητες του εδάφους. Από την εδαφοτομή λαμβάνονταν διαταραγμένα δείγματα εδάφους για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, καθώς επίσης και αδιατάρακτα για τον προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους στην υδατοϊκανότητα, θ_{FC} , και στο σημείο μόνιμης μάρανσης, θ_{PWP} , καθώς και για τον προσδιορισμό της φαινομενικής πυκνότητας ρ_b . Τα αδιατάρακτα δείγματα λαμβάνονταν από κάθε στρώση της εδαφοτομής με ειδικό δειγματολήπτη αδιατάρακτου δείγματος, σε μεταλλικούς κυλίνδρους διαμέτρου 5 cm και ύψους 5 cm.

Υδατοϊκανότητα - Σημείο Μόνιμης Μάρανσης

Ο προσδιορισμός της υγρασίας στην υδατοϊκανότητα και στο σημείο μόνιμης μάρανσης έγινε με χρήση της τεχνικής της σταδιακής αφαίρεσης νερού από αδιατάρακτα δείγματα εδάφους. Προς τούτο χρησιμοποιήθηκε η τράπεζα πίεσης (Soil moisture equipment) του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής. Η κατά βάρος υγρασία των δειγμάτων σε επίπεδα πιέσεων 0,3 και 15 bars που εφαρμόζονταν με τη συσκευή

του δίσκου πίεσης και της μεμβράνης πίεσης, αντιστοίχως, προσδιορίστηκαν με τη θερμοβαρυμετρική μέθοδο. Η κατ' όγκο υγρασία των δειγμάτων υπολογίσθηκε από την κατά βάρος υγρασία επί την φαινομενική ξηρή πυκνότητα του εδάφους. Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (total available water, TAW) που υπολογίσθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1 για κάθε στρώση του εδάφους.

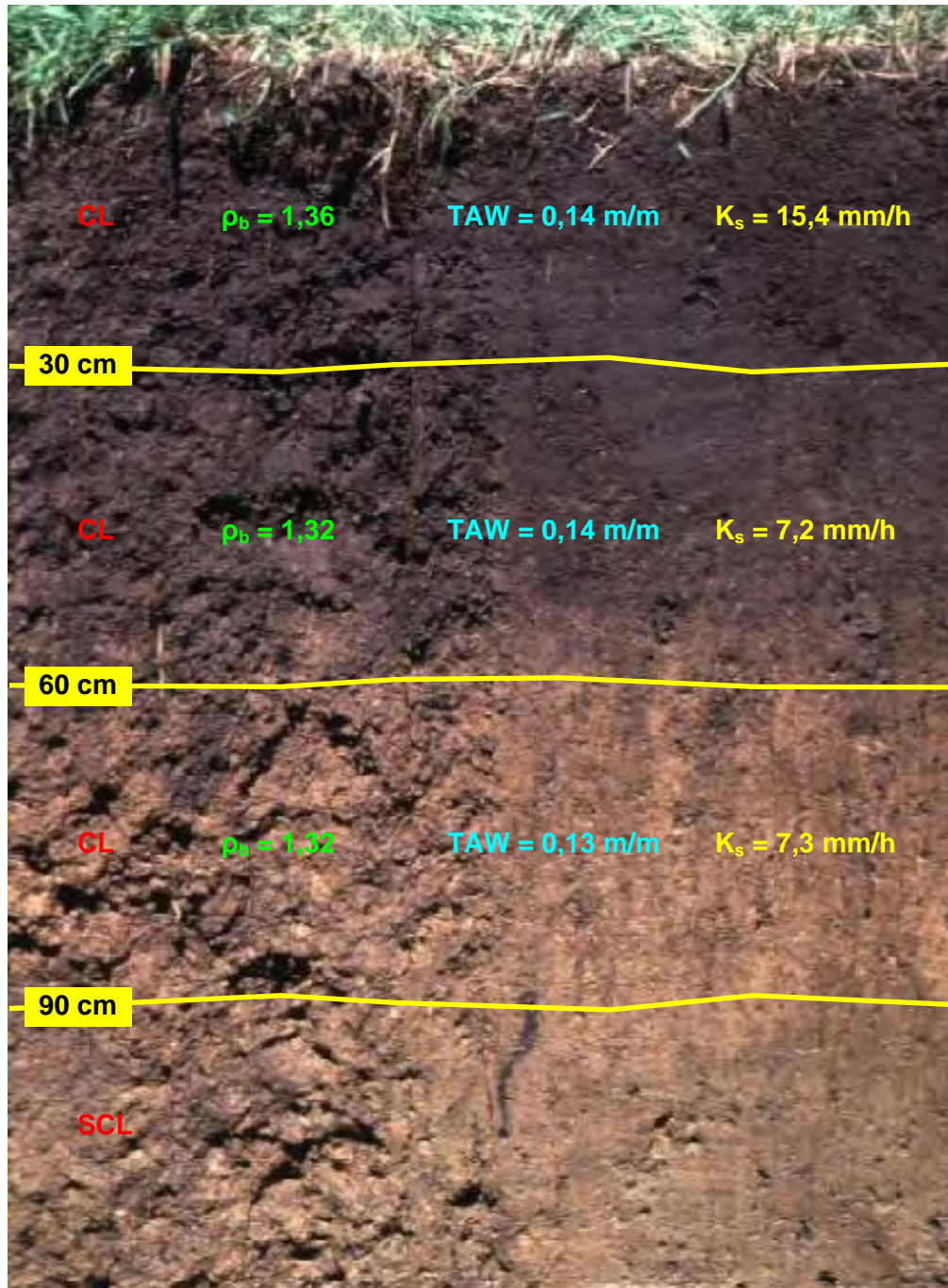
Υδραυλική αγωγιμότητα

Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, K_s , προσδιορίστηκε στον αγρό με το υδροπερατόμετρο Guelph της Soil moisture equipment (Reynolds and Elrick, 1985). Μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού με το περατόμετρο Guelph έχουν γίνει από τους Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ. ά. (1994), Τζιμόπουλο κ. ά. (1996), (2000). Οι μετρήσεις έγιναν στο μέσο περίπου της κάθε πεδολογικής στρώσης του εδάφους σε βάθη 15, 45 και 75 cm. Οι τιμές της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1 είναι ο μέσος όρος δύο μετρήσεων με το υδροπερατόμετρο Guelph.

3.2.2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Οι καλλιεργητικές επεμβάσεις στους αγρούς περιλάμβαναν άροση κατά το φθινόπωρο, αναμόχλευση πριν τη σπορά και κατεργασία του επιφανειακού στρώματος του εδάφους για την προετοιμασία της σποροκλίνης. Η σπορά των ζαχαροτεύτλων έγινε με πνευματική σπαρτική μηχανή τεσσάρων μονάδων του Αγροκτήματος. Χρησιμοποιήθηκε η ποικιλία ζαχαροτεύτλων Arrieta.

Η σπορά για κάθε καλλιεργητική περίοδο έλαβε χώρα στις 21 Απριλίου 2003, 19 Απριλίου 2004 και 12 Απριλίου 2005. Η τοποθέτηση των σπόρων έγινε σε βάθος 2 cm και σε αποστάσεις 50 cm μεταξύ των γραμμών και 7,5 cm επί της γραμμής, έτσι ώστε μετά από αραίωμα η απόσταση να είναι περίπου 20 cm. Αμέσως μετά τη σπορά ακολούθησε εφαρμογή προφυτρωτικής ζιζανιοκτονίας. Κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου η καλλιέργεια δέχθηκε όλες τις απαραίτητες καλλιεργητικές φροντίδες όπως μεταφυτρωτική ζιζανιοκτονία, προληπτικούς ψεκασμούς με μυκητοκτόνα κατά της κερκόσπορας και του ωιδίου και με εντομοκτόνα για καταπολέμηση της φθοριμαίας.



Εικόνα 3.1: Ο εδαφικός τύπος, η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b), η διαθέσιμη υγρασία (TAW) και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (K_s) σε κάθε στρώση του εδάφους του πειραματικού αγρού.

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

Το πειραματικό σχέδιο περιελάμβανε οχτώ μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

1 **ΕΣ Επιφανειακή εφαρμογή νερού με σταγόνα.**

Συνεχής (συμβατική) εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.

2 **ΕΔ Επιφανειακή διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα.**

Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.

3 **ΕΒ Επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα με βαρύτητα.**

Εφαρμογή του νερού μέσω επιφανειακού συστήματος στάγδην με χαμηλή παροχή σταλακτών (0,8 L/h) μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης δια βαρύτητας.

4 **ΥΣ Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα.**

Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.

5 **ΥΔ Υπόγεια διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα.**

Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.

6 **ΥΒ Υπόγεια εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα με βαρύτητα.**

Εφαρμογή του νερού μέσω υπογείου συστήματος στάγδην με χαμηλή παροχή (0,8 L/h) μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης δια βαρύτητας.

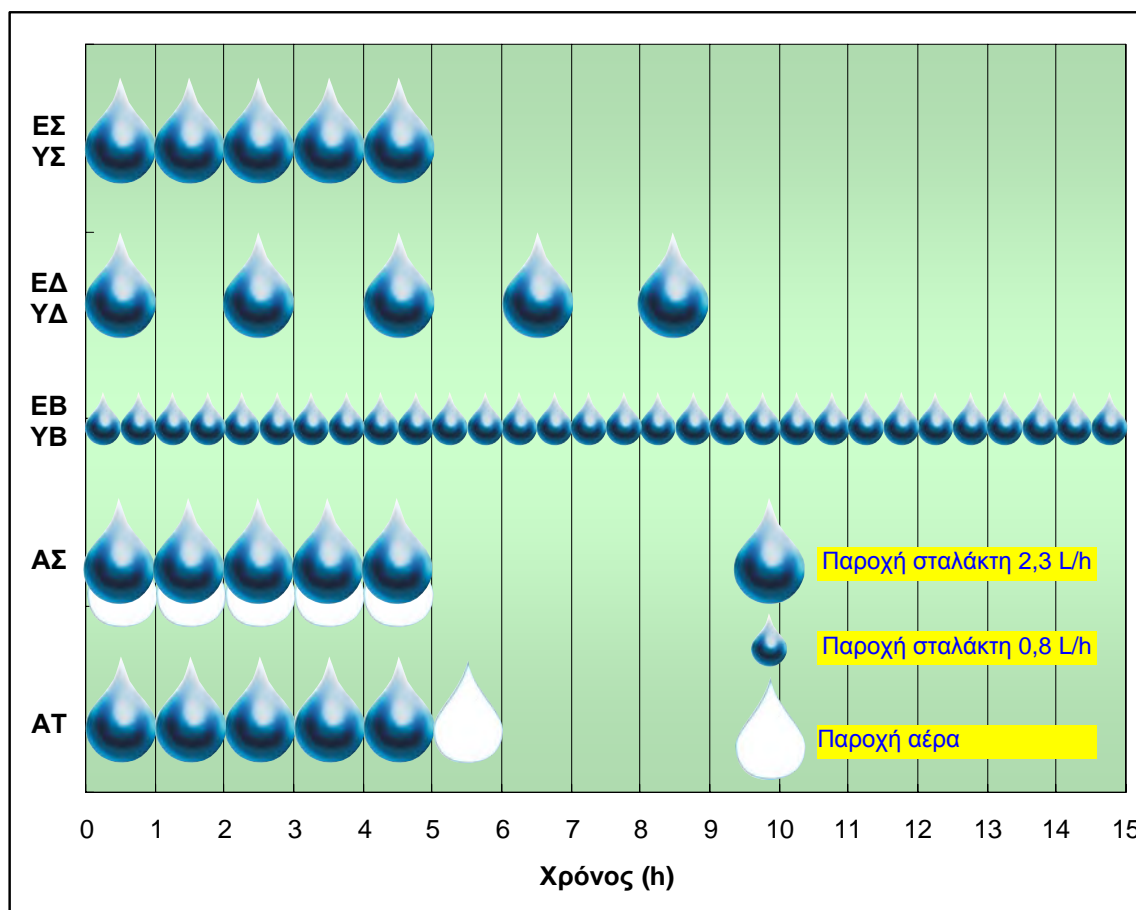
7 **ΑΣ Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με ταυτόχρονη εφαρμογή αέρα.**

Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h και ταυτόχρονη παροχέτευση αέρα στο σύστημα μέσω συσκευής venturi.

8 **ΑΤ Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης.**

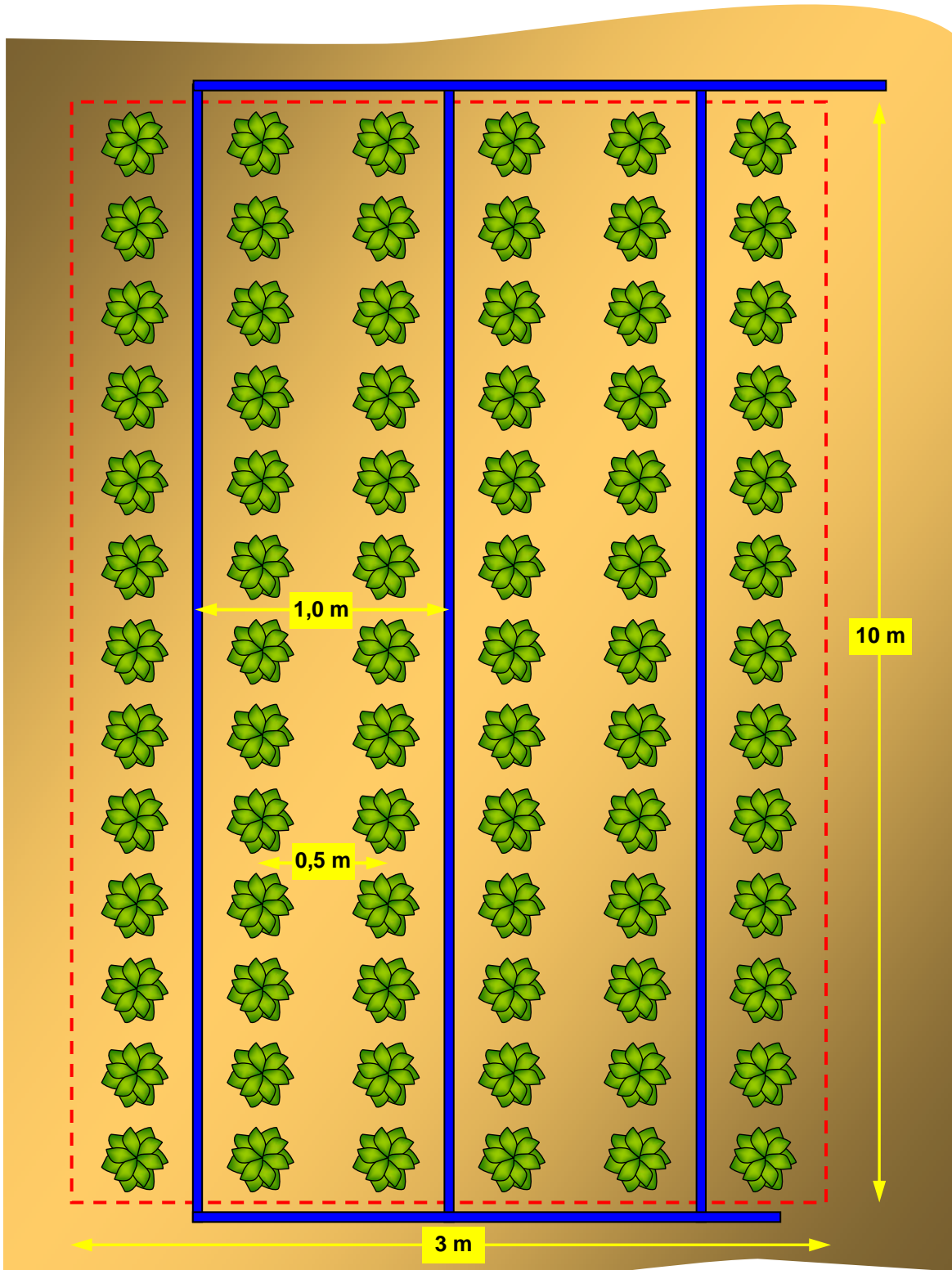
Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή 2,3 L/h και παροχέτευση αέρα υπό πίεση στο τέλος της άρδευσης μέσω αεροσυμπιεστή.

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της διαφοροποίησης των τεχνικών άρδευσης, ήτοι της συνεχούς (επιφανειακής και υπόγειας), της διακοπτόμενης (επιφανειακής και υπόγειας), της χαμηλής παροχής με βαρύτητα (επιφανειακής και υπόγειας) και της παροχέτευσης αέρα κατά την διάρκεια μιας τυπικής άρδευσης. Η ποσότητα νερού, η δόση άρδευσης δηλαδή που υπολογιζόταν κατά την διαδικασία του προγραμματισμού άρδευσης, ήταν η ίδια για όλες τις επιφανειακές και διαφορετική από την επιφανειακή αλλά ίδια μεταξύ τους για όλες τις υπόγειες μεταχειρίσεις. Ανάμεσα στις επιφανειακές ή τις υπόγειες υπήρχε διαφοροποίηση ως προς την μέση ένταση της εφαρμογής αφού η αυτή ποσότητα νερού, εφαρμοζόταν σε διαφορετικές διάρκειες άρδευσης (περιλαμβανομένων και των παύσεων στην διακοπτόμενη εφαρμογή).



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση των τεχνικών κατά την διάρκεια μιας τυπικής άρδευσης. ΕΣ: Συνεχής επιφανειακή, ΥΣ: Συνεχής υπόγεια, ΕΔ: διακοπτόμενη επιφανειακή, ΥΔ: διακοπτόμενη υπόγεια, ΕΒ: επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής, ΥΒ: υπόγεια εφαρμογή χαμηλής παροχής, ΑΣ: συνεχής εφαρμογή αέρα, ΑΤ: εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης.

Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 3 m × 10 m (Εικόνα 3.3) και περιελάμβανε έξι σειρές φυτών. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο επίδρασης της άρδευσης σε κάποιο τεμάχιο από κάποιο γειτονικό αυτού, δεν συγκομίσθηκαν οι εξωτερές σειρές φυτών.



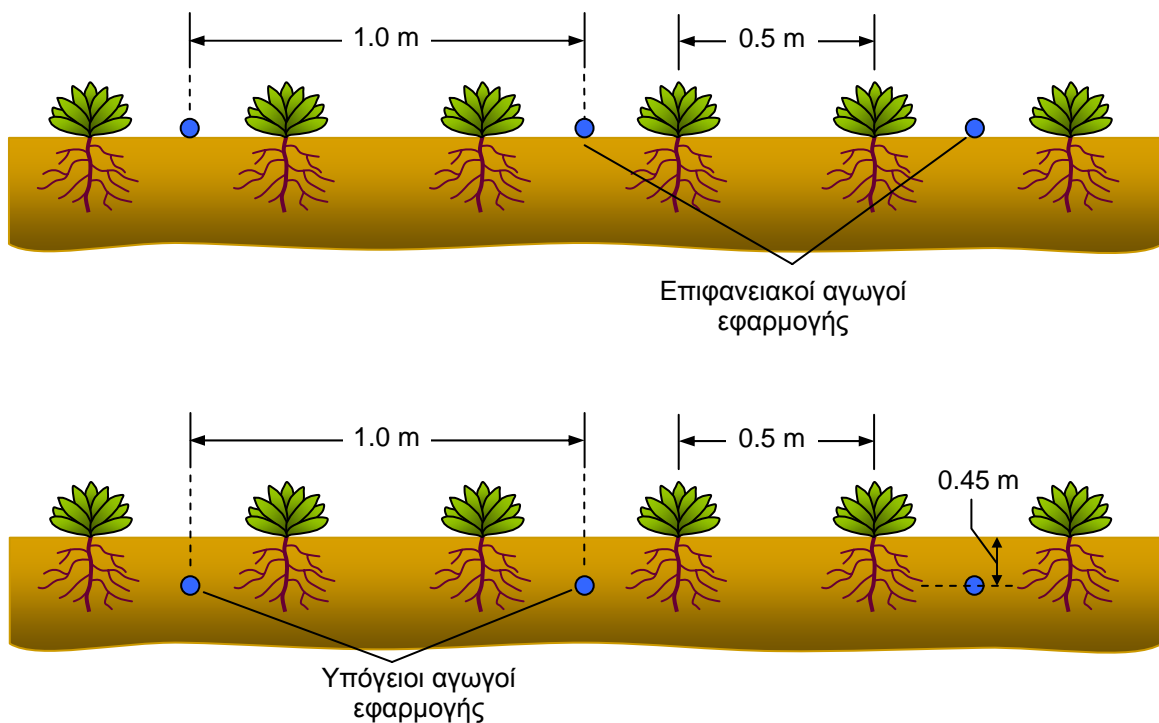
Εικόνα 3.3: Η διάταξη των φυτών και των αγωγών εφαρμογής στο πειραματικό τεμάχιο.

3.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

3.4.1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πριν από την εγκατάσταση της καλλιέργειας έγινε η εγκατάσταση του υπογείου συστήματος στάγδην άρδευσης. Οι υπόγειοι αγωγοί εφαρμογής τοποθετήθηκαν με τη χρήση υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45 m, σε ισασποχή 1 m, όπως σχηματικά παρουσιάζει η Εικόνα 3.4. Η εγκατάσταση του επιφανειακού δικτύου άρδευσης έγινε αργότερα, όταν η ανάπτυξη των φυτών ήταν στο στάδιο του β' ζεύγους πραγματικών φύλλων. Όπως και στο υπόγειο σύστημα, η απόσταση μεταξύ των σταλακτηφόρων αγωγών ήταν 1,0 m. Έτσι, τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό δίκτυο ανάμεσα σε δύο σταλακτηφόρους αγωγούς παρεμβάλλονταν δύο σειρές φυτών.

Η επιλογή της απόστασης αυτής έγινε διότι η εγκατάσταση ενός μόνιμου συστήματος άρδευσης, όπως είναι η υπόγεια στάγδην άρδευση, θα πρέπει να εξυπηρετεί και τις ανάγκες και άλλων καλλιεργειών.



Εικόνα 3.4: Η θέση των αγωγών εφαρμογής στο επιφανειακό και στο υπόγειο σύστημα, αντιστοίχως.

Το δίκτυο άρδευσης περιελάμβανε έναν κύριο αγωγό διαμέτρου 32-mm για την μεταφορά του νερού από δεξαμενή στην κεφαλή ελέγχου. Η κεφαλή περιελάμβανε:

- έναν ηθμό δίσκων 200 mesh,

- έναν ρυθμιστή που μείωνε την πίεση εισόδου και την διατηρούσε σταθερή στην έξοδο του σε ένα χαμηλότερο επίπεδο, το οποίο μπορούσε να μεταβληθεί σε κάθε περίπτωση, μέσω χειρισμού ειδικού κοχλία. Ο έλεγχος της πίεσης ανάντη και κατόντη του ρυθμιστή πίεσης γινόταν με μηχανικά μανόμετρα.
- ένα υδρόμετρο για την καταγραφή της συνολικής ποσότητας νερού,
- έναν διανομέα που περιελάμβανε βαλβίδες στραγγαλισμού και ηλεκτροβαλβίδες (μία για κάθε μεταχείριση) και υδρόμετρα (ένα για κάθε μεταχείριση).

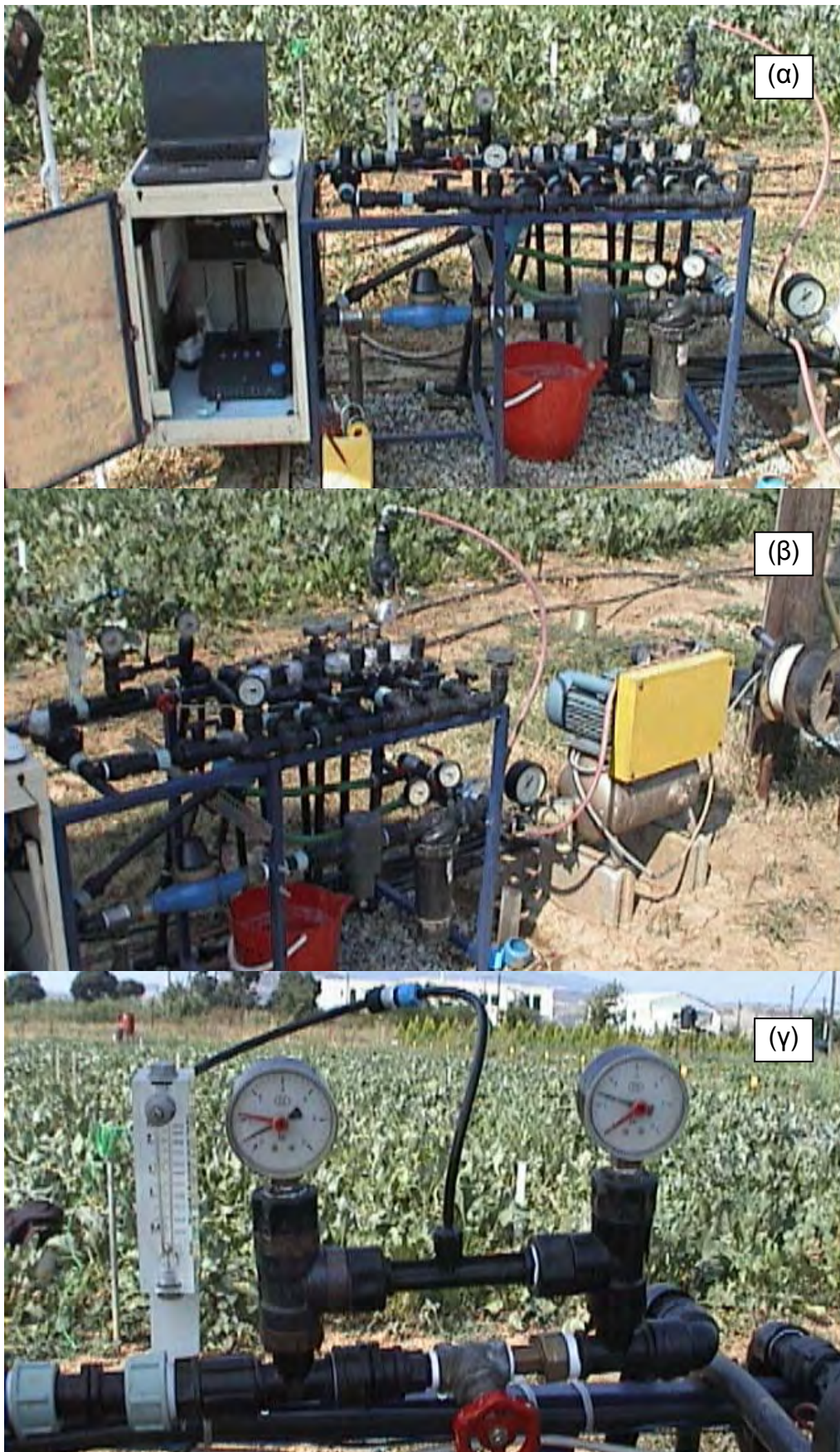
Κάθε βαλβίδα με το υδρόμετρό της συνδέονταν σε αγωγό διαμέτρου 25 mm ο οποίος τροφοδοτούσε τα τέσσερα τεμάχια της κάθε μεταχείρισης. Το υπόγειο σύστημα περιελάμβανε βαλβίδες ανακούφισης (μία για κάθε μεταχείριση), οι οποίες επιτρέπουν την είσοδο αέρα στο δίκτυο όχι όμως και την έξοδο νερού, όταν το σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας, για την αποφυγή εισρόφησης νερού από τους σταλάκτες στο τέλος κάθε αρδευτικού κύκλου.

Επίσης, τα τέρματα των αγωγών εφαρμογής της κάθε μεταχείρισης συνδέονταν με έναν αγωγό διαμέτρου 20-mm, που στο τέρμα του είχε τοποθετηθεί μια βαλβίδα έκπλυσης, η οποία χρησιμεύει στον καθαρισμό των σταλακτηφόρων αγωγών κατά την έναρξη κάθε κύκλου λειτουργίας, ούτως ώστε να απομακρύνονται υλικά, τα οποία μπορεί να συγκεντρώνονται στους αγωγούς.

Οι ηλεκτροβαλβίδες ήταν συνδεδεμένες με προγραμματιστή άρδευσης δίδοντας έτσι την δυνατότητα αυτοματοποίησης της άρδευσης. Ο προγραμματιστής (Hardie, TC800 LXII) έθετε σε λειτουργία το αντλητικό συγκρότημα και ρύθμιζε την διαδοχική λειτουργία των ηλεκτροβαλβίδων των διαφόρων στάσεων (μεταχειρίσεων).

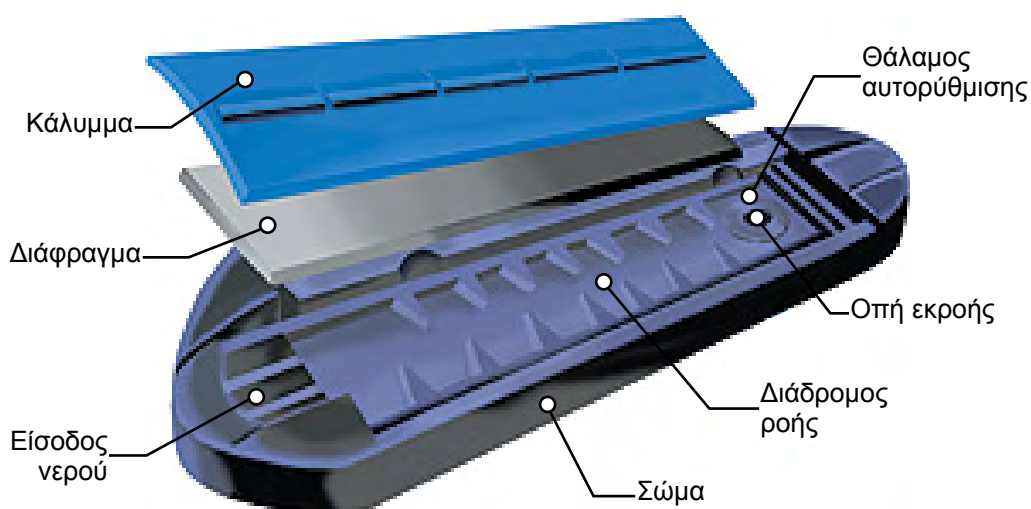
Για την παροχέτευση του αέρα στο δίκτυο, στην αρχή του δευτερεύοντα και μετά την ηλεκτροβαλβίδα, είχε συνδεθεί παράλληλα στην γραμμή άρδευσης μια συσκευή venturi στην μια περίπτωση και ένας αεροσυμπιεστής στην άλλη, για την συνεχή έγχυση και την παροχέτευση αέρα στο τέλος της άρδευσης, αντιστοίχως.

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται η διάταξη της κεφαλής ελέγχου των συστημάτων. Στην 3.5α φαίνεται η μονάδα ελέγχου του συστήματος, ενώ στην 3.5β φαίνεται ο αεροσυμπιεστής συνδεδεμένος στην μονάδα ελέγχου και στην 3.5γ φαίνεται η διάταξη έγχυσης αέρα με τον σωλήνα venturi.



Εικόνα 3.5: Η κεφαλή ελέγχου των συστημάτων άρδευσης με κανονική παροχή.

Οι αγωγοί εφαρμογής (κατασκευασμένοι από την Netafim S.A.) από πολυαιθυλένιο, με διάμετρο 20 mm, είχαν ενσωματωμένους αυτορυθμιζόμενους σταλάκτες RAM (Εικόνα 3.6) με παροχή $2,3 \text{ L h}^{-1}$ σε ένα εύρος πίεσης από 50 έως 300 kPa (0,5 – 3,0 Atm), σε ισαποχή 0,8 m. Οι αγωγοί εφαρμογής στο υπόγειο σύστημα τοποθετήθηκαν με τον σταλάκτη προσανατολισμένο προς την επιφάνεια του εδάφους για την αποφυγή έμφραξης λόγω εδαφικού υλικού που κατακάθεται στο τέλος της άρδευσης.



Εικόνα 3.6: Ο σταλάκτης RAM που χρησιμοποιήθηκε.

Πριν την έναρξη των αρδεύσεων, κάθε έτος, γίνονταν έλεγχος των αγωγών εφαρμογής, προκειμένου να διαπιστωθεί η ομοιόμορφη εφαρμογή και η ακρίβεια στην ποσότητα του εφαρμοζόμενου νερού. Το όλο σύστημα ελέγχονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο έλεγχος περιελάμβανε:

- Την παρατήρηση της λειτουργίας των βαλβίδων έκπλυσης.
- Παρατήρηση της επιφάνειας του αγρού για αναγνώριση πολύ ξηρών ή πολύ υγρών περιοχών.
- Παρατήρηση των υδρομέτρων και έλεγχος της παρατηρούμενης ποσότητας νερού που χορηγήθηκε σε σχέση με την ποσότητα που είχε σχεδιασθεί να χορηγηθεί. Υψηλότερη παροχή υποδύκνειε διαρροή, ενώ χαμηλότερη της αναμενόμενης υποδύκνειε έμφραξη.

3.4.2. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΒΑΡΥΤΗΤΑ

Το σύστημα χαμηλής παροχής με την λειτουργία υπό χαμηλή πίεση (βαρύτητα) περιελάμβανε μια δεξαμενή νερού από πλαστικό χωρητικότητας 200 L και δευτερεύοντες αγωγούς διαμέτρου 32 mm στους οποίους συνδέθηκαν οι αγωγοί εφαρμογής αγωγοί. Η δεξαμενή ήταν αναρτημένη σε μια βάση και διέθετε μηχανισμό ελέγχου της στάθμης του νερού με πλωτήρα. Η ροή του νερού από την δεξαμενή ελέγχονταν μέσω βαλβίδας ενώ ένας πλαστικός ηθμός με πλαστικό πλέγμα 200 mesh ήταν τοποθετημένος κατάντη της βαλβίδας για τον καθαρισμό του νερού και την αποφυγή έμφραξης των σταλακτών.

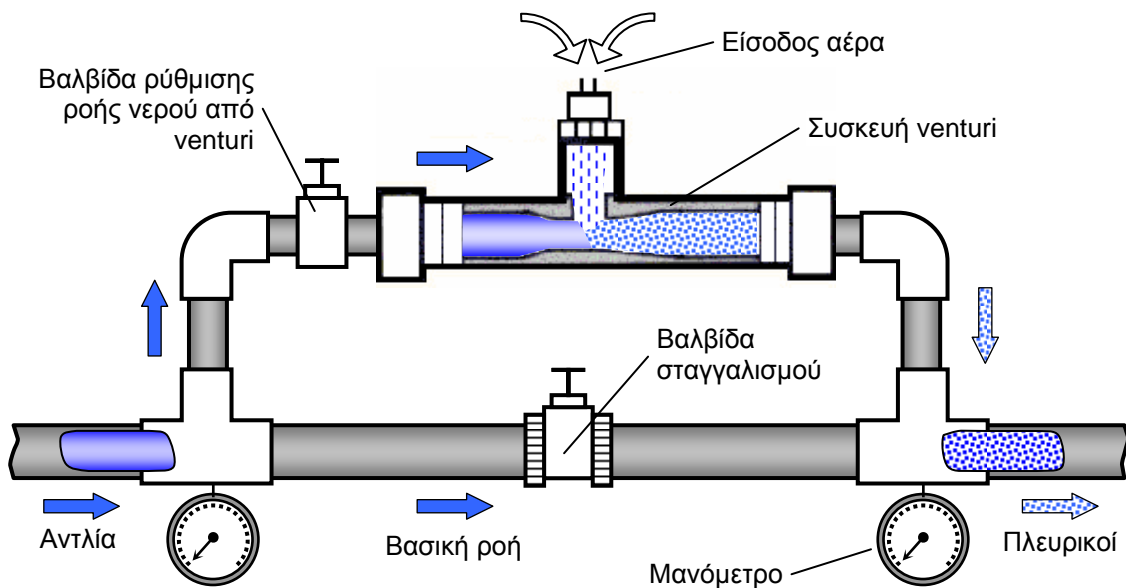
Η δεξαμενή βαρύτητας πληρωνόταν με νερό από μια δεύτερη δεξαμενή ευρισκόμενη υψηλότερα υψομετρικά, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτούταν από την γεώτρηση του αγροκτήματος. Ένας μηχανισμός με πλωτήρα τοποθετήθηκε στην δεξαμενή βαρύτητας για τον έλεγχο (ρύθμιση) της στάθμης του νερού και επομένως της πίεσης του συστήματος. Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος στάγδην άρδευσης χαμηλής πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7: Αποψη του συστήματος χαμηλής παροχής δια της βαρύτητας.

3.4.3. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ

Η παροχέτευση αέρα στο σύστημα επιτυγχάνετο με την έγχυση αέρα με ρυθμό 12% κατ' όγκο της χορηγούμενης ποσότητας νερού (Goorahoo, et al., 2001) χρησιμοποιώντας μια συσκευή venturi (Mazzei corporation) συνδεδεμένη παράλληλα στην γραμμή άρδευσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Στην είσοδο αέρα της συσκευής venturi τοποθετήθηκε βαλβίδα στραγγαλισμού και ένα πλωτήρομετρο για τον έλεγχο της παροχής αέρα στο σύστημα.



Εικόνα 3.8: Η σύνδεση του σωλήνα venturi στην γραμμή άρδευσης.

Η αναρρόφηση αέρα από τον σωλήνα venturi λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1997). Το νερό εισέρχεται στον σωλήνα και καθώς περνά στην στένωση (θάλαμος αναρρόφησης) μεταβάλλεται σε ένα ρεύμα υψηλής ταχύτητας. Η αύξηση της ταχύτητας έχει ως συνέπεια την μείωση της πίεσης, επιτρέποντας έτσι την αναρρόφηση αέρα από το περιβάλλον μέσω της εισόδου αέρα. Στο νερό αμέσως δημιουργούνται φυσαλίδες. Καθώς το νερό φθάνει στην έξοδο, επανέρχεται σε χαμηλότερη πίεση, αυτήν με την οποία λειτουργεί το δίκτυο. Έτσι το νερό μεταφέρει αέρα στο αρδευτικό σύστημα. Η διάταξη επέτρεπε μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού να περάσει από την συσκευή venturi σε μια συγκεκριμένη πίεση. Η επιθυμητή συνθήκη λειτουργίας επιτυγχάνετο με τον έλεγχο της πίεσης στα μανόμετρα της συνδεσμολογίας και ρυθμίζοντας την βαλβίδα στραγγαλισμού.

Για την εφαρμογή αέρα υπό πίεση, χρησιμοποιήθηκε ένας αεροσυμπιεστής που συνδέθηκε στην κεφαλή ελέγχου και παροχέτευε αέρα υπό πίεση μέσω των αγωγών εφαρμογής, μετά το τέλος της άρδευσης και για χρονική περίοδο τόση όση χρειαζόταν για να εφαρμοσθεί αέρας σε ποσοστό περίπου 12% του εφαρμοσθέντος νερού (Goorahoo, et al., 2001, Heuberger et al., 2001).

3.5. ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.5.1. ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ

Η ποσότητα του νερού που εφαρμοζόταν σε κάθε άρδευση ελέγχονταν και καταγραφόταν μέσω μηχανικών υδρομέτρων που ήταν συνδεδεμένα στον δευτερεύοντα αγωγό κάθε μεταχείρισης. Η καταγραφή των μετρήσεων γινόταν τουλάχιστον πριν την έναρξη και με το πέρας της άρδευσης. Ο έλεγχος των υδρομέτρων ήταν συνεχής, σε τακτά διαστήματα κατά τη διάρκεια της άρδευσης, προκειμένου να γίνουν αντιληπτές δυσλειτουργίες ή αστοχίες του συστήματος και κυρίως πιθανές διαρροές.

Έτσι, η καταγραφή της παροχής του συστήματος μέσω των υδρομέτρων χρησιμοποιήθηκε ως ένα μέσο ελέγχου της ομοιομορφίας εφαρμογής του νερού, κυρίως στο υπόγειο σύστημα και για τον έλεγχο τυχόν αποκλίσεων από την επιθυμητή δόση άρδευσης.

3.5.2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας, καθώς και η παρακολούθηση των μεταβολών της στο χρόνο και στο χώρο, αποτελεί βασική συνιστώσα εκείνων των πρακτικών διαχείρισης του αρδευτικού νερού, που στηρίζονται στη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους σε ένα ορισμένο διάστημα τιμών, αναπληρώνοντας την κατανάλωση του νερού από τα φυτά, με άρδευση.

Για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι που ταξινομούνται σε άμεσες και έμμεσες (Gardner et al., 1991). Οι άμεσες μέθοδοι απαιτούν τη λήψη δειγμάτων από το έδαφος, κάθε φορά που επιζητείται η μέτρηση της υγρασίας του. Από τα δείγματα αφαιρείται το νερό με θέρμανση ή με κάποια χημική διαδικασία και προσδιορίζεται η ποσότητα του νερού που απομακρύνεται. Η κυριότερη μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η θερμοβαρυμετρική μέθοδος στην οποία το νερό απομακρύνεται από το εδαφικό δείγμα με θέρμανση στους 105°C έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος του (Gardner et al., 1991). Οι μετρήσεις με τις μεθόδους αυτές είναι χρονοβόρες, καθότι απαιτούνται τουλάχιστον δύο ημέρες για την πραγματοποίησή τους. Επίσης, οι μετρήσεις δεν μπορούν να επαναληφθούν στο ίδιο σημείο, καθώς η απόσπαση των δειγμάτων διαταράσσει το έδαφος στο σημείο δειγματοληψίας.

Για το λόγο αυτό, όταν απαιτείται η μελέτη της χρονικής μεταβολής της υγρασίας, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται δείγματα από περισσότερα του ενός σημεία, ώστε να εξουδετερώνεται η χωρική μεταβλητότητα. Οι άμεσες μέθοδοι παρόλα τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε πολλές περιπτώσεις, αλλά κυρίως στη βαθμονόμηση των έμμεσων μεθόδων, επειδή δίνουν ακριβείς μετρήσεις (Gardner et al., 1991).

Στις έμμεσες μεθόδους η εδαφική υγρασία προσδιορίζεται έμμεσα από τις μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, οι οποίες συναρτώνται με την εδαφική υγρασία. Οι μετρήσεις γίνονται με μόνιμα τοποθετημένους στο έδαφος αισθητήρες, οι οποίοι συνδέονται με μία μονάδα μέτρησης, κάθε φορά που απαιτείται η μέτρηση της υγρασίας. Σε άλλες περιπτώσεις οι αισθητήρες προωθούνται στο έδαφος μέσω ειδικών σωλήνων που τοποθετούνται εκ των προτέρων στο έδαφος. Έτσι με τις έμμεσες μεθόδους είναι δυνατόν να γίνονται διαδοχικές στο χρόνο μετρήσεις στην ίδια θέση, πολύ σύντομα και χωρίς διατάραξη του εδάφους. Οι πιο διαδομένες από τις έμμεσες μεθόδους είναι η μέθοδος των νετρονίων, η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης και οι μέθοδοι της διηλεκτρικής σταθεράς. Στις μεθόδους που στηρίζονται στη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς ανήκει και η μέθοδος TDR της οποίας σύντομη περιγραφή γίνεται πιο κάτω.

Η μέθοδος TDR

Η μέθοδος μέτρησης χρόνου ανάκλασης ηλεκτρομαγνητικού παλμού ή χρονικής ανακλασιμετρίας (Topp et al., 1980, Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.α., 1997), που είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως TDR (Time Domain Reflectometry), προσδιορίζει την εδαφική υγρασία έμμεσα από τη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για να διατρέξει ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής συχνότητας το μήκος ενός βυθισμένου στο έδαφος κυματοδηγού. Από τις τιμές του χρόνου αυτού υπολογίζεται η φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και από αυτή προσδιορίζεται η κατ' όγκο υγρασία του (Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη κ.α., 1997, Kalfountzos et al., 2002, 2003).

Ο χρόνος διαβίβασης και κατ' επέκταση η διηλεκτρική σταθερά του υγρού εδάφους εξαρτάται από την αναλογία των τριών φάσεων του εδάφους (νερό, αέρας και στερεά συστατικά). Η διηλεκτρική σταθερά του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και κυμαίνεται από 74 έως 84 (80,2 στους 20 °C), είναι δε περίπου

εικοσαπλάσια εκείνης των στερεών συστατικών του εδάφους (3 έως 5) και 80 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αέρα (1,0005 στους 20 °C).

Οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού και των άλλων φάσεων του εδάφους, καθιστά τη φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, ευαίσθητη στην εδαφική υγρασία. Βασιζόμενοι σ' αυτό, οι Torpp et al. (1980) πρότειναν μία εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της κατ' όγκο εδαφικής υγρασίας, θ_v , από τη φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, K_b , όπως αυτή υπολογίζεται με την τεχνική TDR:

$$\theta_v = -0,053 + 0,0292K_b - 0,00055K_b^2 + 0,0000043K_b^3 \quad [3:1]$$

Η εμπειρική αυτή σχέση ισχύει για ευρύ φάσμα ανόργανων εδαφών και υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την εδαφική υγρασία. Στις περιπτώσεις που αδυνατεί να περιγράψει τη σχέση θ_v - K_b , απαιτείται βαθμονόμηση της μεθόδου για τις ειδικές συνθήκες της κάθε περίπτωσης.

Η μέθοδος TDR έχει χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας στο εργαστήριο και στον αγρό τους Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά. (1997), Sakellariou-Maktantonaki (1997), Kalfountzos et al. (2002), (2003).

Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τη μέθοδο TDR

Για τη μέτρηση της υγρασίας στο έδαφος όπως και σ' άλλα πορώδη μέσα, υπάρχει σήμερα ποικιλία συστημάτων TDR, μερικά από τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτόχρονη μέτρηση της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας στο πειραματικό μέρος της διατριβής αυτής είναι το σύστημα Moisture Point (ESI) και το σύστημα Time-FM (Imko GmbH).

Το σύστημα Moisture point χρησιμοποιήθηκε για την λήψη μετρήσεων από την εδαφική κατατομή καθόλη την αρδευτική περίοδο ενώ η Time-FM χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της υγρασίας στην επιφανειακή στρώση του εδάφους, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από κάποιες αρδεύσεις και για μετρήσεις στην εδαφική κατατομή, σε ορύγματα που δημιουργήθηκαν κάθετα στις γραμμές των αγωγών εφαρμογής.

Η διάταξη Moisture Point (Εικόνα 3.9) περιλαμβάνει τη συσκευή TDR με ενσωματωμένο επεξεργαστή και την οθόνη προβολής των μετρήσεων, τα καλώδια επικοινωνίας της συσκευής με τον ανιχνευτή (αισθητήρα) και τον ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές (ράβδοι) της διάταξης έχουν τετραγωνική διατομή και λαμβάνουν

ταυτόχρονα μετρήσεις από διαφορετικά βάρη της εδαφικής κατατομής. Η τιμή της υγρασίας δίδεται στην οθόνη του οργάνου σε ποσοστό % κ.ο.

Η βαθμονόμηση του οργάνου έχει γίνει από τον κατασκευαστή. Με το πέρασ κάθε καλλιεργητικής περιόδου γινόταν έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης του οργάνου με τη λήψη δειγμάτων εδάφους από τα σημεία όπου ήταν τοποθετημένοι οι αισθητήρες από κάθε βάθος μέτρησης και τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας με την θερμοβαρυμετρική μέθοδο.



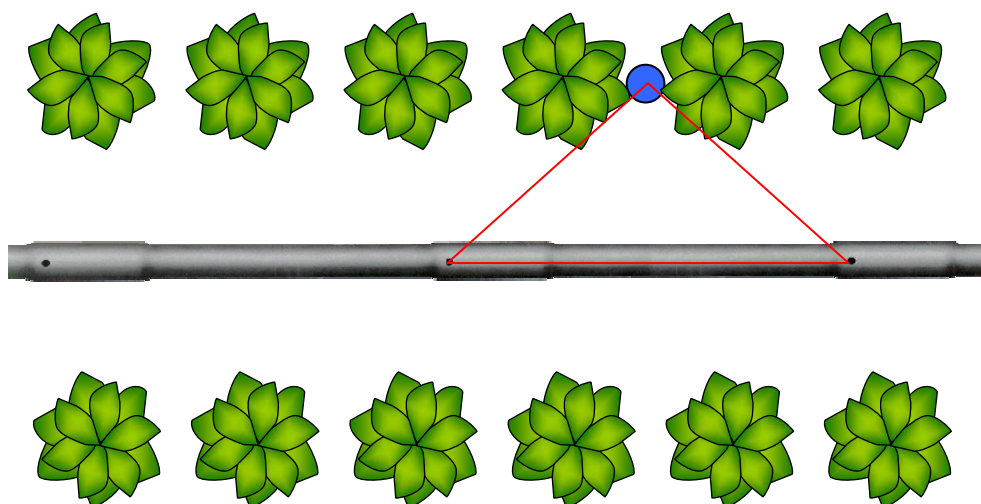
Εικόνα 3.9: Η διάταξη μέτρησης εδαφικής υγρασίας Moisture Point.

Οι ανιχνευτές (ράβδοι) τοποθετούνταν στο έδαφος μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας. Οι ράβδοι τοποθετούνταν σε βάθος τέτοιο, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους σε βάθος έως 1,2 m με ράβδους μήκους 1,425 m.

Σε κάθε σημείο λαμβάνονταν τρεις μετρήσεις. Ο μέσος όρος των τριών μετρήσεων καταγράφονταν ως υγρασία του εδάφους του εν λόγω σημείου. Οι τρεις μετρήσεις είναι απαραίτητες, επειδή ο αποτελεσματικός όγκος του εδάφους από τον οποίο προέρχεται η κάθε μέτρηση παρουσιάζει ελλειπτική μορφή. Η υψηλότερη ευαισθησία παρουσιάζεται στο εγγύς περιβάλλον της ράβδου και μειώνεται εκθετικά με την απόσταση. Επίσης όταν μετράται η υγρασία της επιφανειακής στρώσης όπου υπάρχει πιθανότητα, λόγω συρρίκνωσης του εδάφους, να δημιουργηθεί στρώμα αέρα μεταξύ της ράβδου και του εδάφους,

Το πρώτο έτος εγκαταστάθηκαν τέσσερις ανιχνευτές μήκους 1,425 m, σε τεμάχια της συμβατικής και διακοπτόμενης άρδευσης. Κατά την δεύτερη και τρίτη καλλιεργητική περίοδο εγκαταστάθηκαν οχτώ ανιχνευτές του ίδιου μήκους σε τεμάχια όλων των μεταχειρίσεων έτσι ώστε να αντιστοιχεί ένας αισθητήρας για κάθε μεταχείριση.

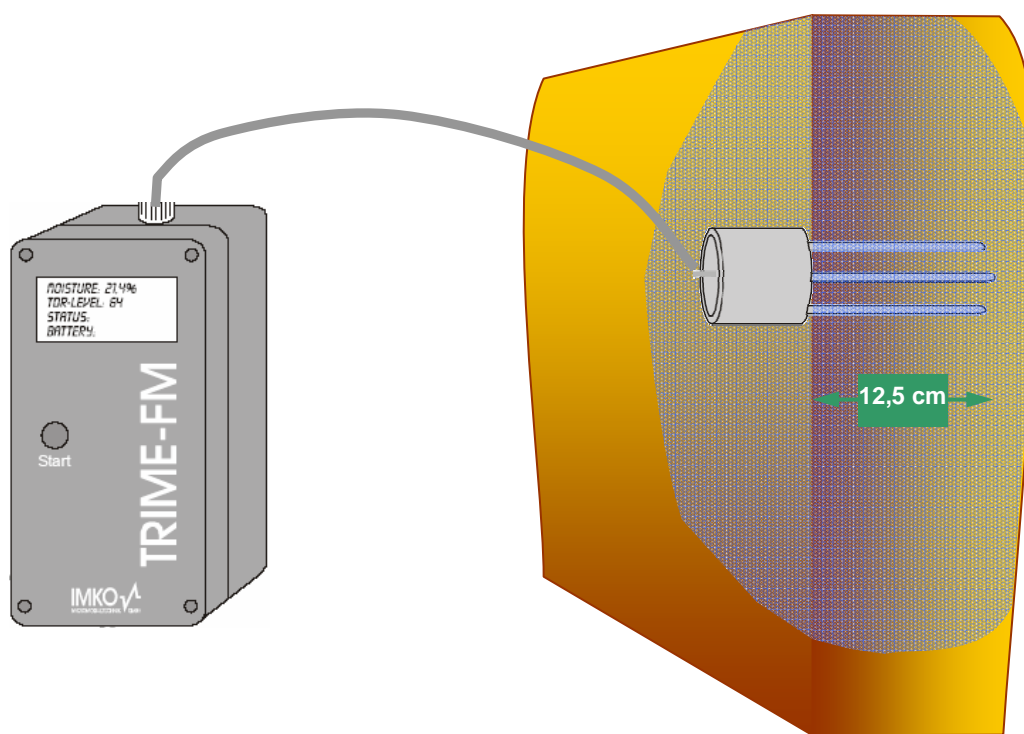
Η τοποθέτηση των ράβδων γίνονταν επί της γραμμής των φυτών, με την ειδική διάταξη που συνοδεύει τη συσκευή, στο μέσο περίπου της απόστασης δύο διαδοχικών σταλακτών (Εικόνα 3.10). Οι μετρήσεις εδαφικής υγρασίας γίνονταν πριν την άρδευση και μία, δύο ή τρεις ημέρες μετά από αυτήν.



Εικόνα 3.10: Το σημείο τοποθέτησης του ανιχνευτή για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας.

Το σύστημα TRIME-FM (Εικόνα 3.11) μπορεί να δεχτεί ραβδωτούς ανιχνευτές με δύο ή τρεις κυματοδηγούς ή κυλινδρικό ανιχνευτή. Ο ραβδωτός ανιχνευτής της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα αποτελείται από ένα κυλινδρικό σώμα από PVC και τρεις κυματοδηγούς TDR. Οι κυματοδηγοί (ράβδοι) είναι τοποθετημένοι στις γωνίες ισοσκελούς τριγώνου πάνω στο σώμα του ανιχνευτή και έχουν μήκος 12,5 cm.

Η συσκευή TRIME-FM δίνει απ' ευθείας την υγρασία του εδάφους εκφρασμένη σε % και δεν χρειάζεται βαθμονόμηση πριν τη χρήση της. Ο ανιχνευτής (κυματοδηγός) της συσκευής βαθμονομείται για τη συγκεκριμένη συσκευή και για συγκεκριμένο μήκος καλωδίου μόνο από τον κατασκευαστή. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη μετρήσεων στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους και για μετρήσεις στην εδαφική κατατομή.



Εικόνα 3.11: Η διάταξη μέτρησης εδαφικής υγρασίας Trime FM.

3.5.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Δείκτης φυλλικής επιφάνειας

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI), είναι μία αδιάστατη παράμετρος του φυλλώματος των φυτών και ορίζεται ως λόγος της φυλλικής επιφάνειας ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους. Ο δείκτης αυτός χαρακτηρίζει τη διεπιφάνεια φυλλώματος-ατμόσφαιρας, μέσω της οποίας γίνεται η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του φυτού και της ατμόσφαιρας (Breda, 2003). Προσδιορίζει τη συγκράτηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα φυτά και κατά συνέπεια επηρεάζει την ανάπτυξη και την απόδοσή τους (Wilhelm et al., 2000).

Επίσης ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας διαμορφώνει το μικροκλίμα μέσα και κάτω από το φύλλωμα του φυτού, προσδιορίζει τη διαπνοή του φυτού, τη συγκράτηση του νερού της βροχής και της άρδευσης από το φύλλωμα και τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα (Breda, 2003). Ακόμη σε πολλά μοντέλα προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας χρησιμοποιείται ως παράμετρος διαχωρισμού της εξατμισοδιαπνοής σε εξάτμιση και διαπνοή.

Για τους λόγους αυτούς σε πολλά πειράματα που αποβλέπουν στη ρύθμιση και την επιβεβαίωση μοντέλων παραγωγής και κατανομής του νερού στο έδαφος, απαιτούνται μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Για τη μέτρηση του LAI έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι που διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες). Στις άμεσες μεθόδους από ένα αριθμό φυτών που αποκόπτονται, διαχωρίζονται τα φύλλα από τα άλλα μέρη του φυτού και προσδιορίζεται το εμβαδόν του συνόλου των φύλλων. Το γινόμενο του μέσου εμβαδού των φύλλων ανά φυτό και της πυκνότητας των φυτών δίνει το δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Εναλλακτικά με αυτές τις μεθόδους ο LAI μπορεί να μετρηθεί χωρίς την καταστροφή των φυτών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το εμβαδόν των φύλλων με τις διαστάσεις τους (de Jesus et al., 2001, Breda, 2003).

Στις έμμεσες μεθόδους ο LAI υπολογίζεται έμμεσα από μετρήσεις της ακτινοβολίας πάνω και κάτω από φύλλωμα της καλλιέργειας (radiation measurement method) ή από την ανάλυση ημισφαιρικής εικόνας (hemispherical image analysis) (Breda, 2003). Στην πραγματικότητα, οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού του LAI που στηρίζονται στη μέτρηση της ακτινοβολίας, δεν εκτιμούν το εμβαδόν των φύλλων, αλλά το εμβαδόν όλων των μερών του φυλλώματος καθώς κι αυτά συμμετέχουν στη συγκράτηση της ακτινοβολίας (Wilhelm et al., 2000, Earl and Davis, 2003).

Μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το σύστημα SunScan

Με βάση την έμμεση μέθοδο μέτρησης της ακτινοβολίας έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μέτρησης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Breda, 2003). Ένα από αυτά τα συστήματα είναι το SunScan canopy analysis system (της Delta-T Devices Ltd), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις του LAI για τις ανάγκες αυτής της έρευνας. Το SunScan μετρά τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία με μήκος κύματος από 400-700 nm, πάνω και κάτω από το φύλλωμα της καλλιέργειας. Από τις μετρήσεις της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας υπολογίζεται ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας με χρήση του νόμου του Beer.

Κατά τους Potter et al. (1996) η χρήση του συστήματος SunScan πρέπει να γίνεται κατά τις μεσημβρινές ώρες όταν η γωνία κλίσης του ήλιου έχει μικρές τιμές. Ενώ πρέπει να αποφεύγονται μετρήσεις σε ώρες της ημέρας που η γωνία κλίσης είναι μεγαλύτερη από 60 μοίρες.

Το SunScan analysis system αποτελείται από τον ανιχνευτή SunScan, τον αισθητήρα BFS (Beam Fraction Sensor) και το τερματικό συλλογής δεδομένων. Ο ανιχνευτής SunScan είναι ένα φορητό όργανο μέτρησης της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας κάτω από το φύλλωμα των φυτών. Ο αισθητήρας BFS χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη μέτρηση της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας πάνω από το φύλλωμα και για το διαχωρισμό της σε άμεση και διαχεόμενη. Το τερματικό συλλογής δεδομένων είναι ένας μικροεπεξεργαστής, όπου καταγράφονται οι μετρήσεις του ανιχνευτή SunScan και του αισθητήρα BFS και υπολογίζεται αυτόματα η τιμή του LAI. Το σύστημα SunScan παρουσιάζει έναντι των άλλων έμμεσων μεθόδων το πλεονέκτημα ότι οι μετρήσεις που γίνονται μ' αυτό, είναι ανεξάρτητες από την κατάσταση του ουρανού όσον αφορά τη νέφωση και δεν επηρεάζονται από τις παροδικές νεφώσεις. Ενώ άλλα συστήματα απαιτούν σταθερή κατάσταση του ουρανού για μεγάλο διάστημα της ημέρας (Wilhelm et al., 2000). Το πλεονέκτημα αυτό του συστήματος SunScan οφείλεται στην ταυτόχρονη μέτρηση της ακτινοβολίας πάνω και κάτω από το φύλλωμα της καλλιέργειας.

Οι μετρήσεις του LAI πραγματοποιούνταν κάθε μήνα περίπου, με κάποιες αποκλίσεις των διαστημάτων μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων που οφείλονταν κυρίως σε αντικειμενικούς λόγους π.χ. πολύ υγρό έδαφος λόγω άρδευσης ή βροχόπτωσης. Όλες οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνταν πάντα στις ίδιες θέσεις που είχαν καθοριστεί κατά την πρώτη μέτρηση. Σε κάθε θέση η έκταση ήταν ίση με 1,5 m² (όσο το

μήκος του ανιχνευτή) παράλληλα προς τις γραμμές σποράς επί την απόσταση τριών γραμμών της καλλιέργειας (3 x 0,5 m). Η έκταση αυτή καλύπτονταν με 12 μετρήσεις, ο μέσος όρος των οποίων καταγράφονταν ως τιμή του LAI για τη συγκεκριμένη θέση.

Φυτική μάζα και παραγωγή

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και στο τέλος αυτής γινόταν η συλλογή των φυτών, χειρωνακτικά, από έκταση που κάλυπταν τρεις γραμμές ζαχαροτεύτλων μήκους δύο μέτρων, ήτοι σε επιφάνεια (3 x 2 m x 0,5 m) τριών τετραγωνικών μέτρων σε κάθε επανάληψη. Μετά την συγκομιδή, γινόταν αποκορύφωση των ζαχαροτεύτλων και ακολουθούσε η μέτρηση του βάρους του υπόγειου τμήματος και του βάρους των κορυφών. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίστηκε το μέσο βάρος του υπόγειου και του υπέργειου τμήματος των φυτών, η στρεμματική απόδοση και η σχετική αναλογία ριζών και κορυφών. Μετά τη ζύγιση των φυτών, δείγματα αυτών ξηραίνονταν στο πυραντήριο σε θερμοκρασία 75 °C έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος (Hunsaker et al., 1998, Tognetti et al. 2003) για τον προσδιορισμό της ξηρής φυτικής μάζας.

Διαστατικά χαρακτηριστικά ριζών

Στα φυτά που συλλέγονταν από κάθε πειραματικό τεμάχιο, μετρήθηκαν παράλληλα το μήκος και οι διάμετροι της ρίζας. Ένα πρόβλημα που διαπιστώθηκε κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων ήταν ότι κατά την εκρίζωση των τεύτλων, τμήμα της κύριας ρίζας, αγνώστου μήκους, στο κατώτερο σημείο έσπαζε και έμενε μέσα στο έδαφος. Το πρόβλημα αυτό γινόταν αναπόφευκτο όταν κατά την εκρίζωση το έδαφος ήταν ξηρό. Για να υπάρξει κάποιο κοινό σημείο αναφοράς ορίστηκε ένα κρίσιμο πάχος σπασίματος της ρίζας. Το πάχος αυτό ορίστηκε στο 1%0 της μέγιστης διαμέτρου της ρίζας και χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του μήκους των ριζών (Καβαλάρης, 2004).

Τεχνολογικά χαρακτηριστικά των ριζών

Οι αναλύσεις έγιναν από τη Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, στα εργαστήρια του Εργοστασίου Λάρισας και περιελάμβαναν τον προσδιορισμό του ζαχαρικού τίτλου (Pol, ζαχαρόζη % του νωπού βάρους) και τη συγκέντρωση των μελασσογόνων ουσιών (κάλιο, K, νάτριο, Na, και επιβλαβές άζωτο, α-N), με τη χρήση ζυγού Venema (Venema automation b.v., Groningen, Holland) και συστήματος ανάλυσης BETALYSER (Dr Wolfgang Kernchen GmbH, Seelze, Germany).

3.5.4. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών. Άμεση επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών ασκούν οι μετεωρολογικές παράμετροι της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας. Οι μετεωρολογικές παράμετροι σχετική υγρασία και ταχύτητα ανέμου, καθώς επίσης και η θερμοκρασία και η ακτινοβολία ασκούν έμμεση επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών, καθώς διαμορφώνουν το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας. Το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας εκφράζεται με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς και εξειδικεύεται για κάθε καλλιέργεια με τους φυτικούς συντελεστές.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για τα τρία έτη διάρκειας των πειραμάτων προέρχονται από μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, που είναι εγκατεστημένος στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου σε απόσταση 40 m από τον πειραματικό αγρό. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αφορούν ημερήσιες τιμές των παραμέτρων: θερμοκρασίας αέρα (μέγιστη, μέση, ελάχιστη, σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους), μέγιστης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και βροχόπτωσης. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, η οποία υπολογίζεται στη διατριβή αυτή με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith.

Η καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων γινόταν σε ωριαία βάση. Η συλλογή τους έγινε με τη βοήθεια καταχωρητή δεδομένων (data logger) και η επεξεργασία τους με το πρόγραμμα Excel.

3.6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα υπέστησαν ανάλυση διακύμανσης ANOVA ακολουθώντας το γενικό γραμμικό μοντέλο. Οι μέσοι όροι συγκρίθηκαν χρησιμοποιώντας την LSD. Όλοι οι στατιστικοί προσδιορισμοί έγιναν για $P \leq 0,05$. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις έγιναν χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο STATGRAFICS (Statistical Graphics Corp.).

Για την κατασκευή των διαγραμμάτων επιφανείας τόσο για την παρουσίαση της σχέσης της παραγωγικότητας της καλλιέργειας με τα κλιματικά δεδομένα και το νερό όσο και για την απεικόνιση της κατανομής της υγρασίας στην εδαφική κατατομή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surfer (Golden Software, Inc).

Υλικά και Μέθοδοι Β. Μεθοδολογία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικειμενικός σκοπός της άρδευσης είναι ο εφοδιασμός των καλλιεργειών με το απαραίτητο νερό για την κανονική ανάπτυξη και βέλτιστη απόδοσή τους. Η ποσοτική εκτίμηση του νερού αυτού αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για τη σωστή εφαρμογή και τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, όπως επίσης και για τη μελέτη και σχεδιασμό των αρδευτικών δικτύων (Παπαζαφειρίου, 1999).

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων. Για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος του φυτικού συντελεστή που απαιτεί τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς και του φυτικού συντελεστή (Doorenbos and Pruitt, 1977, Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999) ενώ λαμβάνεται υπόψη η διαθεσιμότητα της εδαφικής υγρασίας στο βάθος του ριζοστρώματος και η εξάτμιση από την εδαφική επιφάνεια. Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών υπολογίζεται σε τρία βήματα:

- α) Αρχικά υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (ET_0).
- β) Ακολούθως, μέσω της ET_0 και του φυτικού συντελεστή της καλλιέργειας υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c).
- γ) Τέλος, υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπό πραγματικές συνθήκες (Allen et al., 1998) οι οποίες αποκλίνουν από τις ιδεατές αφού υπεισέρχονται παράγοντες όπως η έλλειψη εδαφικής υγρασίας, μικρή γονιμότητα εδάφους, τοξικότητα αλάτων, ασθένειες, προσβολές από έντομα, κακή στράγγιση, παρουσία σκληρών ή αδιαπέρατων εδαφικών οριζόντων στο βάθος του ριζοστρώματος, καθώς και η παρουσία αλάτων ($ET_{c \text{ ACT}}$).

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Ένας καλλιεργούμενος αγρός χάνει νερό με τη διαδικασία της διαπνοής από τα φυτά και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Ακόμη, μετά από βροχή ή άρδευση με καταιονισμό, το νερό που συγκρατείται από το υπέργειο μέρος των φυτών εξατμίζεται προς την ατμόσφαιρα. Αθροιστικά, το νερό που χάνεται από έναν καλλιεργημένο αγρό με διαπνοή από τα φυτά, εξάτμιση από το έδαφος και εξάτμιση από το φύλλωμα, όταν αυτό είναι υγρό, αναφέρεται σαν εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration, ET) και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των φυτών και του εδάφους, τη διαθέσιμη ενέργεια και τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα (Παπαζαφειρίου, 1999).

4.2.1. ΕΞΑΤΜΙΣΗ (E)

Εξάτμιση, E, (evaporation) είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό μετατρέπεται σε υδρατμούς και απομακρύνεται από μια επιφάνεια. Το νερό εξατμίζεται από μια ποικιλία επιφανειών, όπως οι λίμνες, οι ποταμοί, τα εδάφη και η υγρή βλάστηση.

Για να μεταβληθεί η κατάσταση των μορίων του νερού από την υγρή στην αέρια φάση απαιτείται ενέργεια. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και σε μικρότερη έκταση η θερμοκρασία του αέρα, παρέχουν αυτήν την ενέργεια. Η κατευθυντήρια δύναμη για την αφαίρεση των υδρατμών από την επιφάνεια εξάτμισης είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης υδρατμών στην επιφάνεια εξάτμισης και αυτής της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας. Καθώς διεξάγεται η εξάτμιση, ο περιβάλλον αέρας γίνεται βαθμιαία κορεσμένος και η διαδικασία επιβραδύνεται και μπορεί να διακοπεί εάν ο κορεσμένος αέρας δεν μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα. Η αντικατάσταση του κορεσμένου αέρα με ξηρότερο εξαρτάται πολύ από την ταχύτητα του ανέμου. Ως εκ τούτου, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του και η ταχύτητα του ανέμου είναι κλιματικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη της διαδικασίας εξάτμισης.

Όταν η επιφάνεια εξάτμισης είναι η επιφάνεια του εδάφους, ο βαθμός σκίασης του θόλου του φυτού και η ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη στην εδαφική επιφάνεια είναι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της εξάτμισης. Συχνές βροχές, άρδευση και νερό που μεταφέρεται προς τα πάνω σε ένα έδαφος από την υπόγεια στάθμη, υγραίνουν την εδαφική επιφάνεια. Όπου το έδαφος είναι σε θέση να

παρέχει το νερό αρκετά γρήγορα για να ικανοποιήσει τη ζήτηση εξάτμισης, η εξάτμιση από αυτό καθορίζεται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες (Allen et al., 1998).

Εντούτοις, αν το χρονικό διάστημα μεταξύ των βροχών ή/και των αρδεύσεων είναι μεγάλο και η συνεισφορά της υπόγειας στάθμης μηδενική, η περιεκτικότητα σε νερό στο επιφανειακό έδαφος μειώνεται και η εδαφική επιφάνεια ξηραίνεται. Κάτω από αυτές τις περιστάσεις, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού ασκεί μίαν ελεγχόμενη επίδραση στην εξάτμιση: ελλείπει οποιοδήποτε ανεφοδιασμό της εδαφικής επιφάνειας με νερό, η εξάτμιση μειώνεται γρήγορα και μπορεί να πάψει σχεδόν εντελώς μέσα σε μερικές ημέρες (Allen et al., 1998).

4.2.2. ΔΙΑΠΝΟΗ (Τ)

Η διαπνοή, T , (transpiration) συνίσταται από την εξάτμιση του νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς και την αφαίρεση υδρατμών προς στην ατμόσφαιρα. Τα φυτά χάνουν το νερό τους κυρίως μέσω των στοματίων. Αυτά είναι μικρά ανοίγματα τα οποία βρίσκονται στην κάτω επιφάνεια του φύλλου του φυτού μέσω των οποίων περνούν αέρια και υδρατμοί. Το νερό, μαζί με μερικές θρεπτικές ουσίες, προσλαμβάνεται από τις ρίζες και μεταφέρεται μέσω του φυτού. Η εξάτμιση εμφανίζεται μέσα στο φύλλο, δηλαδή τα μεσοκυττάρια διαστήματα και η ανταλλαγή υδρατμών με την ατμόσφαιρα ελέγχεται από το άνοιγμα των στοματίων. Σχεδόν όλο το νερό που προσλαμβάνεται χάνεται από την διαπνοή και μόνο ένα πολύ μικρό μέρος χρησιμοποιείται μέσα στα φυτά.

Η διαπνοή, όπως και η άμεση εξάτμιση, εξαρτάται από τον ενεργειακό ανεφοδιασμό, την κλίση πίεσης των υδρατμών και τον άνεμο. Ως εκ τούτου, η ακτινοβολία, η θερμοκρασία αέρα, η υγρασία αέρα και οι παράμετροι του ανέμου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και κατά την μελέτη της διαπνοής. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά καθορίζουν επίσης τον ρυθμό διαπνοής.

Ο ρυθμός διαπνοής επηρεάζεται επίσης από τα χαρακτηριστικά του φυτού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις καλλιεργητικές πρακτικές. Τα διάφορα είδη φυτών μπορούν να έχουν διαφορετικούς ρυθμούς διαπνοής. Όχι μόνο ο τύπος της καλλιέργειας αλλά και η ανάπτυξή της, το περιβάλλον και η διαχείριση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη της διαπνοής (Allen et al., 1998, 2000).

4.2.3. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ΕΤ)

Η εξάτμιση και η διαπνοή εμφανίζονται ταυτόχρονα. Εκτός από τη διαθεσιμότητα νερού στο επιφανειακό έδαφος, η εξάτμιση από ένα καλλιεργούμενο έδαφος καθορίζεται κυρίως από το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην εδαφική επιφάνεια. Αυτό το μέρος μειώνεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου καθώς η καλλιέργεια αναπτύσσεται και το φύλλωμα των φυτών σκιάζει όλο και περισσότερο την επιφάνεια του εδάφους. Όταν η καλλιέργεια είναι μικρή, το νερό χάνεται κυρίως από την εξάτμιση, αλλά μόλις αυτή αναπτυχθεί καλά και καλύψει εντελώς το έδαφος, η διαπνοή γίνεται η κύρια διαδικασία απώλειας νερού. Στη σπορά σχεδόν το 100% της ΕΤ προέρχεται από την εξάτμιση, ενώ στην πλήρη φυτοκάλυψη περισσότερο από το 90% της ΕΤ προέρχεται από την διαπνοή (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999, Allen, 2000).

4.2.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Οι κλιματικές παράμετροι, τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και οι πρακτικές διαχείρισης αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τις διαδικασίες της εξάτμισης και της διαπνοής.

Κλιματικοί παράγοντες

Οι κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής ασκούν καθοριστική επίδραση στη διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής από μια καλλιέργεια. Κύριοι κλιματικοί παράγοντες είναι η καθαρή ακτινοβολία, ο άνεμος, η υγρασία και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, που διαμορφώνουν το μηχανισμό μετακίνησης των υδρατμών από τη φυτική επιφάνεια (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999).

Φυτικοί παράγοντες

Τα φυτικά είδη διαφέρουν μεταξύ τους σε ότι αφορά την περίοδο ανάπτυξης, την πυκνότητα του φυλλώματος, το ύψος, την πυκνότητα του ριζικού συστήματος και, όταν αυτά εγκαθίστανται, στον τρόπο σποράς και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Οι διαφορές αυτές, σε συνδυασμό με τις συνθήκες του περιβάλλοντος μπορεί να διαφοροποιήσουν το μέγεθος και την κατανομή της εξατμισοδιαπνοής από είδος σε είδος.

Η εξατμισοδιαπνοή δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου των καλλιεργειών. Αυτό βέβαια οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη

διαφοροποίηση των καιρικών συνθηκών κατά τη βλαστική περίοδο όπως και στην ένταση της καθαρής ακτινοβολίας που δέχεται η καλλιέργεια. Σημαντικό όμως ρόλο παίζει και η φυσιολογία των καλλιεργειών, ιδίως των ετήσιων. Στις καλλιέργειες αυτές διακρίνουμε τέσσερα βασικά στάδια ανάπτυξης. Τα στάδια αυτά διαφέρουν μεταξύ τους κατά το ποσοστό κάλυψης του εδάφους αλλά και κατά τα χαρακτηριστικά τραχύτητας της φυτοκόμης που οφείλεται σε φυσιολογικές διεργασίες. Τελική συνέπεια όλων των παραπάνω είναι η διαρκής διαφοροποίηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας από την εγκατάσταση έως τη συγκομιδή (Παπαζαφειρίου, 1999).

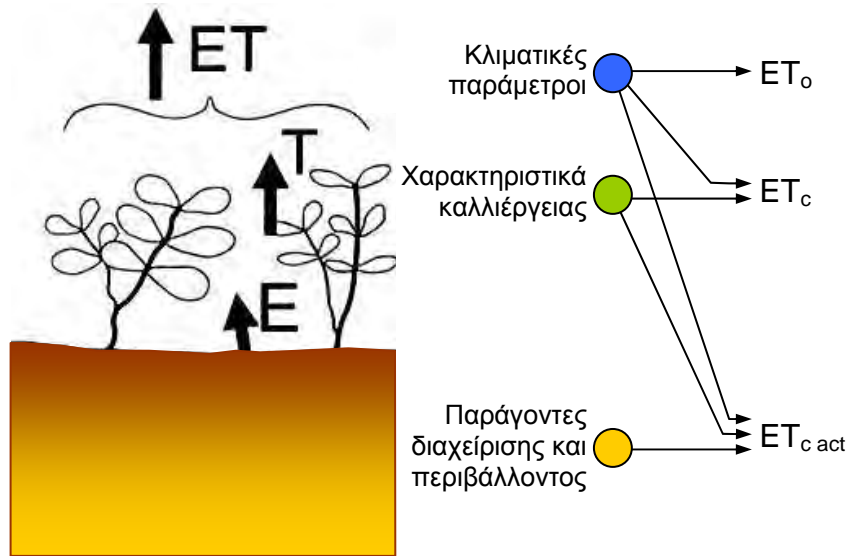
Παράγοντες διαχείρισης και περιβάλλοντος

Παράγοντες όπως η αλατότητα του εδάφους, η φτωχή γονιμότητα, η περιορισμένη εφαρμογή λιπασμάτων, η παρουσία σκληρών ή αδιαπέρατων εδαφικών οριζόντων, η απουσία ελέγχου ασθενειών και εντόμων και η φτωχή διαχείριση του εδάφους μπορεί να περιορίσουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας και να μειώσουν την εξατμισοδιαπνοή.

Άλλοι παράγοντες που πρέπει να μελετώνται κατά την εκτίμηση της ET είναι η φυτοκάλυψη του εδάφους, η πυκνότητα των φυτών και η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού. Η επίδραση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας στην ET εξαρτάται κυρίως από το επίπεδο του υδατικού ελλείμματος και από τον τύπο του εδάφους. Αντιθέτως, η ύπαρξη περίσσιου νερού επιφέρει κορεσμό, συνθήκη η οποία μπορεί να προκαλέσει ζημιές στο ριζικό σύστημα και να περιορισθεί έτσι η πρόσληψη νερού από τα φυτά αφού αναστέλλεται η αναπνοή (Παπαζαφειρίου, 1999, Kotsopoulos et al., 2003).

Κατά την εκτίμηση της ET, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι πρακτικές διαχείρισης που επιδρούν στους κλιματικούς και φυτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της ET. Οι καλλιεργητικές πρακτικές και η μέθοδος άρδευσης μπορεί να μεταβάλλουν το μικροκλίμα, να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ή την ύγρανση του εδάφους και του φυλλώματος των φυτών. Η εξάτμιση μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα ορθά σχεδιασμένο σύστημα άρδευσης με σταγόνες. Άλλες πρακτικές περιλαμβάνουν την χρήση επικαλυμάτων (mulches) ή υλικά μείωσης της διαπνοής (anti-transpirants) (Allen et al., 1998).

Όταν οι συνθήκες στον αγρό διαφέρουν από τις κανονικές, απαιτείται η διόρθωση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, ET_c. Η διόρθωση αναφέρεται στην επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος και της διαχείρισης στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Στην Εικόνα 4.1 συνοψίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ET.



Εικόνα 4.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ET.

4.2.5. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET₀)

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή βάσης, ET₀, (reference evapotranspiration), είναι η ένταση με την οποία νερό, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας αναφοράς. Καλλιέργειες αναφοράς είναι ένας χλοοτάπητας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς εκφράζεται σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την ET₀ είναι οι κλιματικοί, συνεπώς, είναι μια κλιματική παράμετρος και υπολογίζεται από κλιματικά δεδομένα (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999, Allen et al., 2000).

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, ET_c, (crop evapotranspiration), είναι η εξατμισοδιαπνοή από καλλιέργειες που αναπτύσσονται υπό άριστες αγρονομικές συνθήκες (είναι δηλαδή ελεύθερη από ασθένειες και οποιουσδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεσή της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά) και συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας και επιτυγχάνουν το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του

περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσονται (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999). Η συνήθης έκφρασή της είναι σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου.

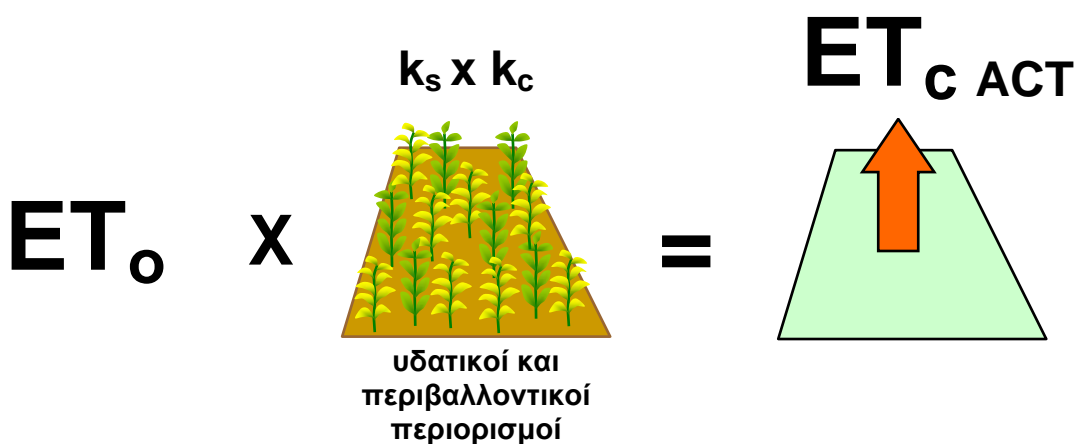
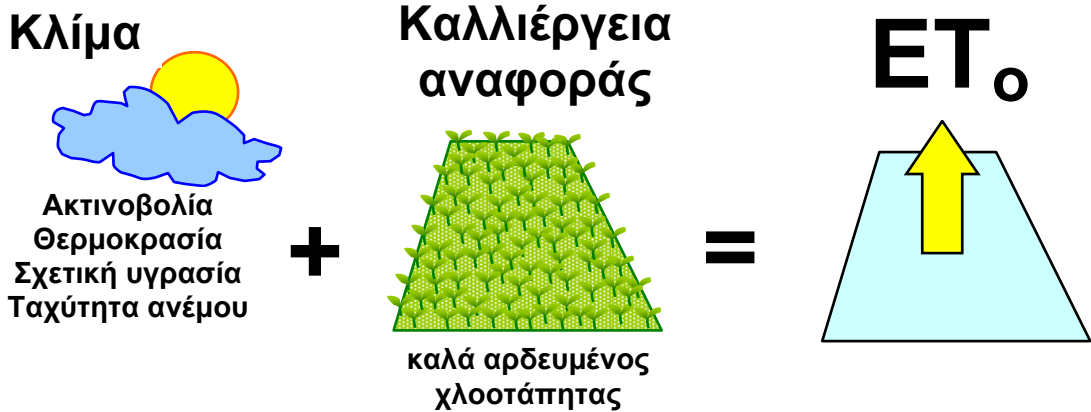
Η ποσότητα του νερού που απαιτείται για να αναπληρώσει την απώλεια λόγω εξατμισοδιαπνοής από την καλλιεργούμενη έκταση ορίζεται ως η ανάγκη της καλλιέργειας σε νερό. Μολονότι οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και των αναγκών αυτής σε νερό είναι ίδιες, οι ανάγκες σε νερό αναφέρονται στην ποσότητα νερού που πρέπει να εφαρμοσθεί ενώ η εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που χάνεται. Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό βασικά αντιπροσωπεύουν την διαφορά μεταξύ των αναγκών σε νερό και της ωφέλιμης βροχόπτωσης. Οι ανάγκες σε αρδευτικό νερό περιλαμβάνουν επίσης το επιπρόσθετο νερό που μπορεί να απαιτείται για έκπλυση αλάτων και για βελτίωση της ομοιομορφίας της εφαρμογής του νερού.

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή ($ET_{c ACT}$)

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπό πραγματικές συνθήκες, $ET_{c ACT}$, (actual evapotranspiration) είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας που αναπτύσσεται υπό συνθήκες περιβάλλοντος και διαχείρισης που αποκλίνουν από τις ιδεατές αφού υπεισέρχονται παράγοντες όπως ασθένειες, προσβολές από έντομα, μικρή γονιμότητα εδάφους, κακή στράγγιση, παρουσία σκληρών ή αδιαπέρατων εδαφικών οριζόντων στο βάθος του ριζοστρώματος, καθώς και η παρουσία αλάτων και η έλλειψη εδαφικής υγρασίας. Έτσι, υπάρχει μείωση στην υδατοκατανάλωση των καλλιεργειών όπως αυτή διαμορφώνεται μέσω της ET_c (Allen et al., 1998, Allen, 2000).

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή υδατικής καταπόνησης K_s ή/και ρυθμίζοντας τον K_c για κάθε είδους καταπόνηση και περιβαλλοντικό περιορισμό στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Είναι προφανές ότι $ET_{c ACT} \leq ET_c$.

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται ο διαχωρισμός μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0), της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c) υπό κανονικές συνθήκες και της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας υπό πραγματικές συνθήκες ($ET_{c ACT}$).



Εικόνα 4.2: Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c) και πραγματική εξατμισοδιαπνοή ($ET_{c ACT}$). k_c : Φυτικός συντελεστής, k_{cb} : Βασικός φυτικός συντελεστής, k_e : συντελεστής εξάτμισης, k_s : συντελεστής υδατικής καταπόνησης.

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ET_o)

4.3.1. Η ΕΞΙΣΩΣΗ PENMAN-MONTEITH ΚΑΤΑ FAO

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization, FAO) σε συνεργασία με την Διεθνή Επιτροπή Αρδεύσεων και Στραγγίσεων (International Commission for Irrigation and Drainage, ICID) και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (World Meteorological Organization, WMO), τον Μάιο του 1990 διοργάνωσαν μια σύσκεψη ερευνητών και άλλων ειδικών, για την ανασκόπηση των μεθόδων FAO για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών και την μετατροπή ή βελτίωση αυτών (Smith et al. 1991). Η ομάδα αυτή συνέστησε την υιοθέτηση της συνδυασμένης μεθόδου Penman-Monteith ως ένα νέο πρότυπο για την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και έδωσε οδηγίες για τις διαδικασίες υπολογισμού των διαφόρων παραμέτρων (Allen et al., 1998, 2000, Walter et al., 2000).

Κατά την παραπάνω επιτροπή ειδικών του FAO, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_o, ορίζεται ως η εξατμισοδιαπνοή από μια υποθετική καλλιέργεια που έχει σταθερό ύψος 12 cm, επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$ και ανακλαστικότητα επιφάνειας (albedo) $\alpha = 0,23$, που προσομοιάζει απόλυτα την εξατμισοδιαπνοή από μια εκτεταμένη επιφάνεια χορτοτάπητα με ομοιόμορφο ύψος, που αναπτύσσεται δυναμικά, που σκιάζει πλήρως το έδαφος και έχει επάρκεια νερού. Έτσι αναπτύχθηκε η μέθοδος Penman-Monteith κατά FAO. Από την εξίσωση των Penman-Monteith και με την εισαγωγή των όρων της αεροδυναμικής και της επιφανειακής αντίστασης, προέκυψε η εξίσωση (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [4:1]$$

όπου:

ET_o = η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm day⁻¹),

R_n = η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻² day⁻¹),

G = η ροή θερμότητας στο έδαφος (MJ m⁻² day⁻¹),

T = η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m (°C),

u_2 = η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m (m s⁻¹),

e_s = η πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa),

e_a = η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),

78 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

$e_s - e_a$ = το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa),

Δ = κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T (kPa °C⁻¹),

γ = η ψυχομετρική σταθερά (kPa °C⁻¹).

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET₀), παρέχει ένα πρότυπο με το οποίο:

- μπορεί να συγκριθεί η εξατμισοδιαπνοή σε διάφορες περιόδους του έτους ή σε άλλες περιοχές,
- μπορεί να συσχετισθεί η εξατμισοδιαπνοή άλλων καλλιεργειών.

4.3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΦΥΛΛΟΥ

Εκτός από τα στοιχεία της τοποθεσίας, η εξίσωση FAO Penman-Monteith απαιτεί δεδομένα θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου για υπολογισμούς σε ημερήσια, εβδομαδιαία ή μηνιαία βάση.

Η ET₀ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό φύλλο του Excel. Η επιλογή του χρονικού βήματος με το οποίο η ET₀ υπολογίζεται εξαρτάται από τον σκοπό του υπολογισμού, την απαιτούμενη ακρίβεια και το χρονικό βήμα (συχνότητα) των διαθέσιμων κλιματικών δεδομένων. Στην παρούσα μελέτη ο υπολογισμός έγινε σε ημερήσιο χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός της ET₀ με την εξίσωση Penman-Monteith σε χρονικές κλίμακες 24 ωρών παρέχει γενικώς ακριβή αποτελέσματα (Allen et al., 1998, Itenfisu et al., 2000, Αλεξίου κ.α., 2000). Η μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων της εξίσωσης Penman-Monteith FAO-56 (Εξίσωση 4:1), παρατίθεται στο Παράρτημα Α της διατριβής.

Τα απαιτούμενα μετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Θερμοκρασία αέρα: μέγιστη (T_{max}) και ελάχιστη (T_{min}) ημερήσιες θερμοκρασίες αέρα.
- Υγρασία αέρα: μέση ημερήσια πραγματική πίεση υδρατμών (e_a) εξαγόμενη από δεδομένα σχετικής υγρασίας.
- Ταχύτητα ανέμου: ημερήσιος μέσος για 24 ώρες ταχύτητας ανέμου μετρημένης σε ύψος 2 m (u_2).
- Ακτινοβολία: καθαρή ακτινοβολία (R_n) υπολογισμένη από την ηλιακή και την μεγάλου μήκους ακτινοβολία.

4.4. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ (ET_c)

Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας υπό κανονικές συνθήκες (ET_c). Οι κανονικές συνθήκες αναφέρονται σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται υπό άριστες αγρονομικές συνθήκες και συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας διαφέρει από αυτήν της καλλιέργειας αναφοράς (ET_o) καθώς η φυτοκάλυψη, τα χαρακτηριστικά του φυλλώματος και η αεροδυναμική αντίσταση διαφέρουν από αυτές του χλοοτάπητα. Η επίδραση των χαρακτηριστικών που διακρίνουν τα καλλιεργούμενα φυτά από τον χλοοτάπητα περιλαμβάνονται στον φυτικό συντελεστή (K_c).

4.4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ET_c

Μέθοδοι άμεσου υπολογισμού

Η εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας μπορεί να μετρηθεί στον αγρό από παρατηρήσεις μεταβολής της εδαφικής υγρασίας και με λυσιμέτρα. Οι συνήθεις μέθοδοι μέτρησης είναι η μέθοδος των διαδοχικών δειγματοληψιών, η μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου και η μέθοδος του λυσιμέτρου (Παπαζαφειρίου, 1999).

Μέθοδος του φυτικού συντελεστή

Οι περισσότερες από τις σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ET περιλαμβάνουν δύο μέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και το δεύτερο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας. Η ET_c προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ET_o με έναν "φυτικό συντελεστή" K_c , (crop coefficient), που είναι χαρακτηριστικός της κάθε καλλιέργειας (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999).

Με βάση τα παραπάνω, διαμορφώνεται η ακόλουθη σχέση:

$$ET_c = K_c ET_o \quad [4:2]$$

όπου:

ET_c = η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm d^{-1}),

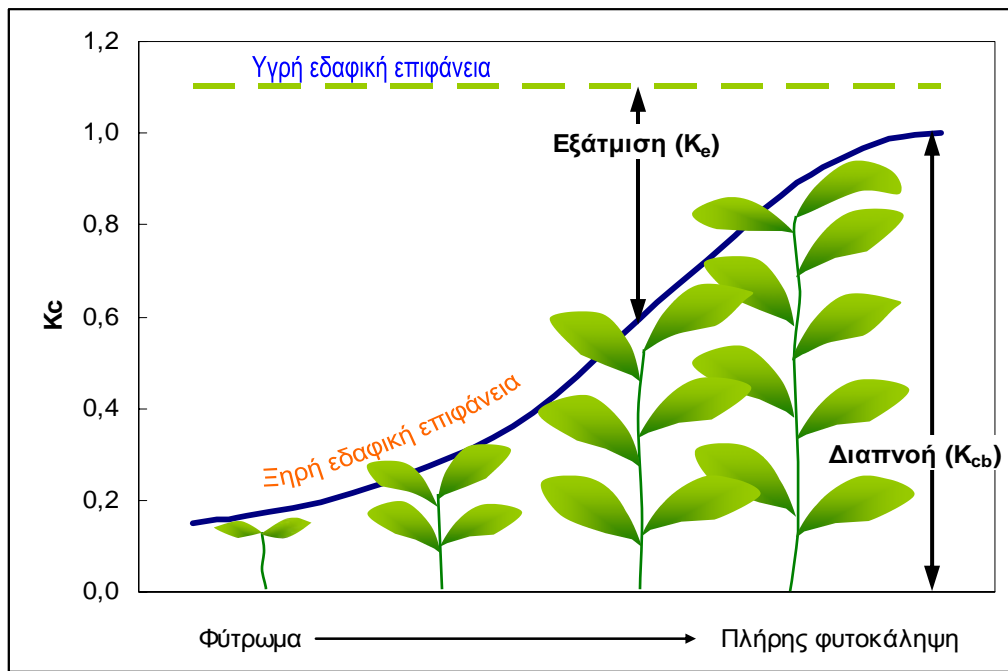
K_c = ο φυτικός συντελεστής (-),

ET_o = η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm d^{-1}).

4.4.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΦΥΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή των φυτικών συντελεστών είναι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, η εποχή σποράς, ο ρυθμός ανάπτυξης της καλλιέργειας, η διάρκεια της βλαστικής περιόδου και οι εδαφικές συνθήκες. Η ημερομηνία σποράς ή φύτευσης επηρεάζει το μήκος της βλαστικής περιόδου, το ρυθμό ανάπτυξης μέχρι την πλήρη κάλυψη του εδάφους από την καλλιέργεια και το χρόνο προς την ωρίμανση (Παπαζαφειρίου, 1999). Οι κλιματικές συνθήκες και ιδιαίτερα η υγρασία της ατμόσφαιρας και η ταχύτητα του ανέμου, επηρεάζουν επίσης την τιμή του K_c . Σε σύγκριση με την ομαλή επιφάνεια ενός χλοοτάπητα, ο άνεμος επηρεάζει το ρυθμό της διαπνοής των ψηλότερων καλλιεργειών, γεγονός που οφείλεται στην αναταραχή που προκαλείται πάνω από αυτήν, την πιο ανώμαλη, φυτική επιφάνεια. Η επίδραση είναι μεγαλύτερη κάτω από ξηρές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Όπως έχει αναλυθεί νωρίτερα, η E_Tc είναι το άθροισμα της διαπνοής από τα φυτά και της εξάτμισης από το έδαφος. Η εξάτμιση, πλην των άλλων, επηρεάζεται και από τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής στρώσης του εδάφους. Κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης, η εξάτμιση είναι σημαντική και εξαρτάται από την υγρασία της επιφάνειας του εδάφους, η οποία επηρεάζεται από τη συχνότητα των βροχών ή των αρδεύσεων κατά την περίοδο αυτή, επηρεάζοντας ανάλογα την τιμή του K_c (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Η επίδραση της εξάτμισης στον φυτικό συντελεστή K_c . Η οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει τον K_c όταν η εδαφική επιφάνεια παραμένει συνεχώς υγρή. Η καμπύλη αντιπροσωπεύει τον K_c όταν η εδαφική επιφάνεια παραμένει ξηρή αλλά τα φυτά λαμβάνουν επαρκές νερό για πλήρη διαπνοή. k_{cb} : Βασικός φυτικός συντελεστής, k_e : συντελεστής εξάτμισης.

Στάδια ανάπτυξης καλλιέργειας

Οι ετήσιες καλλιέργειες παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση, κυρίως σε ότι αφορά το ποσοστό κάλυψης του εδάφους, το ύψος των φυτών και την φυλλική τους επιφάνεια κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στη διαμόρφωση των τιμών του φυτικού συντελεστή. Για τη διευκόλυνση του προσδιορισμού των τιμών αυτών, η βλαστική περίοδος χωρίζεται σε τέσσερα κύρια στάδια ανάπτυξης (Παπαζαφειρίου, 1999):

Αρχικό στάδιο ή στάδιο εγκατάστασης

Το στάδιο αυτό αρχίζει με τη σπορά ή φύτευση και φτάνει μέχρι την οριστική εγκατάσταση της καλλιέργειας. Κατά το στάδιο αυτό το ποσοστό κάλυψης του εδάφους είναι από μηδενικό μέχρι το πολύ ίσο με 10%, οπότε η E_Tc κυριαρχείται από την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους, λόγω του πολύ μικρού ποσοστού φυτοκάλυψης, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται από την υγρασία της επιφάνειας, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα των βροχών ή/και των αρδεύσεων.

Στάδιο ταχείας ανάπτυξης ή στάδιο κύριας βλάστησης

Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από την έντονη ανάπτυξη των φυτών, αρχίζει μετά το τέλος του προηγούμενου σταδίου και τελειώνει με την πλήρη κάλυψη του εδάφους από την καλλιέργεια. Το έδαφος θεωρείται πλήρως καλυμμένο όταν το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι $\geq 70\%$. Η σταδιακή αύξηση του ποσοστού κάλυψης συνεπάγεται μια συνεχή μεταβολή του φυτικού συντελεστή, που αρχίζει από μια ελάχιστη τιμή που είναι ίση με αυτή του αρχικού σταδίου και φτάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή, όταν το φύλλωμα καλύψει πλήρως την επιφάνεια του αγρού, τιμή η οποία είναι ίση με τον φυτικό συντελεστή του επόμενου σταδίου.

Στάδιο μέσης περιόδου ή στάδιο διαμόρφωσης της παραγωγής

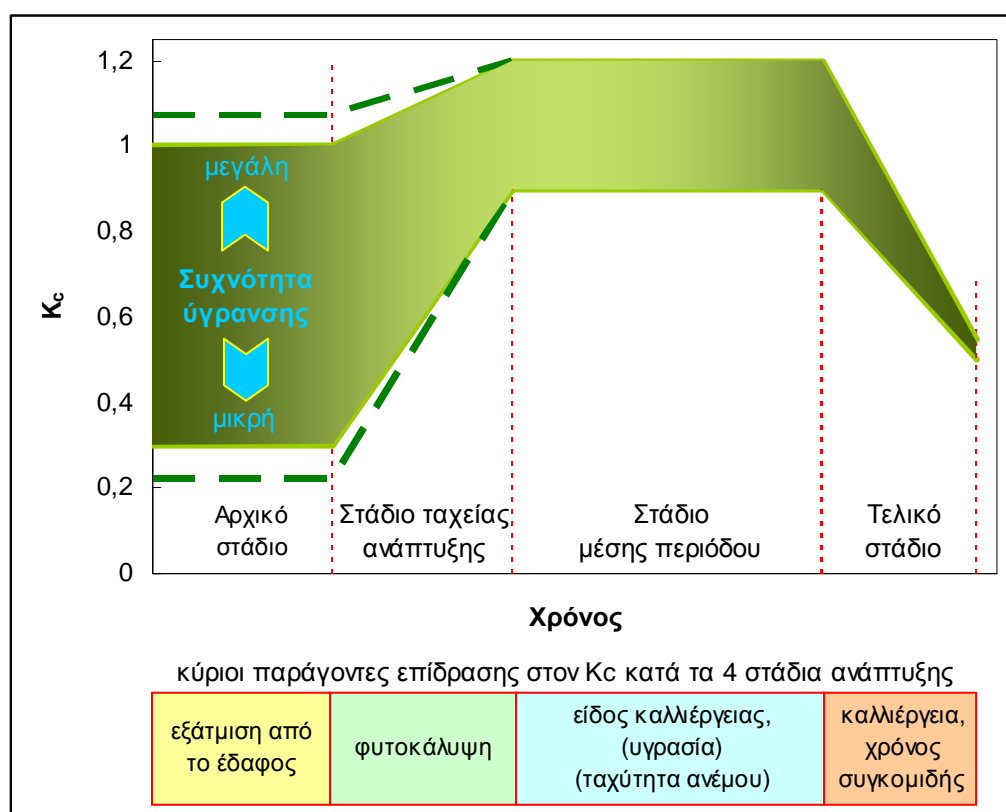
Κατά το στάδιο αυτό η κάλυψη του εδάφους από τα φυτά είναι πλήρης και περιλαμβάνει τις περιόδους ανθοφορίας και σχηματισμού των καρπών. Λόγω της πλήρους φυτοκάλυψης, η τιμή του K_c παραμένει σταθερή για όλη την περίοδο και διαμορφώνεται στο υψηλότερο επίπεδο όλης της βλαστικής περιόδου.

Τελικό στάδιο ή στάδιο ωρίμανσης

Κατά το στάδιο αυτό συντελείται η ωρίμανση και τερματίζεται με τη συγκομιδή. Το στάδιο αυτό έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες, αφού η ποιότητα και ποσότητα των συγκομιζόμενων προϊόντων έχει άμεση σχέση με το επίπεδο της εδαφικής υγρασίας και τις φυσιολογικές

διαφοροποιήσεις των φυτών που γίνονται κατά τη διάρκειά του. Λογικά, η τιμή του K_c του σταδίου αυτού πρέπει να μειώνεται όσο προχωρούμε προς το χρόνο συγκομιδής.

Η Εικόνα 4.4 παρουσιάζει την μεταβολή του K_c όπως επηρεάζεται από τους κλιματικούς παράγοντες και την ανάπτυξη της καλλιέργειας.



Εικόνα 4.4: Τυπικό εύρος μεταβολής του φυτικού συντελεστή K_c κατά τα τέσσερα στάδια ανάπτυξης (Πηγή: Allen et al., 1998).

4.4.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ K_c

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπολογίζεται όπως προαναφέρθηκε πολλαπλασιάζοντας την E_{T_0} με τον K_c , τον συντελεστή που εκφράζει την διαφορά μεταξύ της καλλιεργούμενης επιφάνειας και της επιφάνειας του χλοοτάπητα αναφοράς. Η διαφορά αυτή μπορεί να περιληφθεί σε έναν απλό (μονό) συντελεστή ή μπορεί να διαχωρισθεί σε δύο συντελεστές που περιγράφουν ξεχωριστά τις διαφορές σε εξάτμιση και διαπνοή μεταξύ των δύο επιφανειών. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τον σκοπό των υπολογισμών, την απαιτούμενη ακρίβεια και το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών. Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τα γενικά κριτήρια επιλογής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. Κριτήρια επιλογής μεθόδου απλού και διπτού φυτικού συντελεστή

	Απλός φυτικός συντελεστής, K_c	Διπτός φυτικός συντελεστής, $K_{cb} + K_e$
Σκοπός υπολογισμού	<ul style="list-style-type: none"> • σχεδιασμός αρδεύσεων • διαχείριση αρδεύσεων • βασικά αρδευτικά προγράμματα • προγραμματισμός άρδευσης σε πραγματικό χρόνο για χαμηλής συχνότητας εφαρμογές νερού (επιφανειακές αρδεύσεις και καταιονισμός) 	<ul style="list-style-type: none"> • έρευνα • προγραμματισμός άρδευσης σε πραγματικό χρόνο • προγραμματισμός άρδευσης για υψηλής συχνότητας εφαρμογή νερού (μικροάρδευση και αυτοματοποιημένος καταιονισμός) • συμπληρωματική άρδευση • λεπτομερείς μελέτες ισοζυγίων εδαφικού νερού και υδρολογικές μελέτες
Χρονικό βήμα	ημερήσιο, δεκαήμερο, μηνιαίο (δεδομένα και υπολογισμοί)	ημερήσιο (δεδομένα και υπολογισμοί)
Μέθοδος επίλυσης	αριθμομηχανή ηλεκτρονικός υπολογιστής	ηλεκτρονικός υπολογιστής

Πηγή: Allen et al., 1998.

Στην μέθοδο του απλού φυτικού συντελεστή, η επίδραση της διαπνοής της καλλιέργειας και της εξάτμισης από το έδαφος συμπεριλαμβάνονται σε έναν μονό φυτικό συντελεστή K_c . Καθώς η εξάτμιση από το έδαφος μπορεί να μεταβάλλεται καθημερινά λόγω βροχής ή άρδευσης, ο απλός φυτικός συντελεστής εκφράζει μόνον την μέση χρονική (πολλών ημερών) επίδραση της εξατμισοδιαπνοής.

Στην μέθοδο του διπτού ή προσαρμοσμένου φυτικού συντελεστή ($K_{cb} + K_e$), οι επιδράσεις της διαπνοής και της εξάτμισης από το έδαφος προσδιορίζονται ξεχωριστά. Χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές: ο βασικός φυτικός συντελεστής (K_{cb}) για να περιγράψει την διαπνοή των φυτών και ο συντελεστής εξάτμισης του εδαφικού νερού, K_e , (soil evaporation coefficient) για να περιγράψει την εξάτμιση από την εδαφική επιφάνεια. Έτσι ο απλός φυτικός συντελεστής K_c αντικαθίσταται από (Allen et al., 1998, Allen, 2000):

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad [4:3]$$

όπου:

K_{cb} = βασικός φυτικός συντελεστής,

K_e = συντελεστής εξάτμισης του εδαφικού νερού.

Ο βασικός φυτικός συντελεστής (K_{cb}), ορίζεται ως ο λόγος της ET_c προς την ET_o όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι ξηρή, οπότε η εξάτμιση μεν από αυτή είναι ελάχιστη, αλλά

η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού δεν περιορίζει την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ο K_{cb} αντιπροσωπεύει την γραμμή αναφοράς του «δυναμικού» K_c όταν δεν υπάρχουν επιπρόσθετες επιδράσεις από την ύγρανση του εδάφους λόγω άρδευσης ή βροχής. Ο συντελεστής εξάτμισης του εδάφους (K_e), περιγράφει το συνθετικό της εξάτμισης από την εδαφική επιφάνεια. Αν το έδαφος είναι υγρό μετά από άρδευση ή βροχή, ο K_e μπορεί να είναι μεγάλος. Παρά ταύτα, το άθροισμα των K_{cb} και K_e δεν μπορεί ποτέ να υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή, $K_{c\ max}$, που καθορίζεται από την διαθέσιμη ενέργεια για εξατμισοδιαπνοή στην επιφάνεια του εδάφους. Καθώς η εδαφική επιφάνεια ξηραίνεται, ο K_e μειώνεται και φθάνει στο μηδέν όταν δεν υπάρχει άλλο νερό για εξάτμιση. Η εκτίμηση του K_e απαιτεί τον υπολογισμό ενός ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου για τον προσδιορισμό του εδαφικού νερού που παραμένει στο επιφανειακό έδαφος.

Η μεθοδολογία του διπτού συντελεστή απαιτεί περισσότερους αριθμητικούς υπολογισμούς από ότι αυτή του απλού φυτικού συντελεστή. Η διπτή διαδικασία είναι καλύτερη για προγραμματισμό αρδεύσεων σε πραγματικό χρόνο, για υπολογισμούς του ισοζυγίου του εδαφικού νερού και για ερευνητικές εργασίες όπου η καθημερινή μεταβολή της υγρασίας της εδαφικής επιφάνειας και κατά συνέπεια η μεταβολή της ημερήσιας ET_c είναι ιδιαίτερος σημαντική. Τέτοια περίπτωση είναι η στάγδην άρδευση με υψηλή συχνότητα και η άρδευση με περιστροφικούς ή γραμμικούς αρδευτές (Allen et al., 1998, Tolk and Howell, 2000).

Καμπύλη του φυτικού συντελεστή

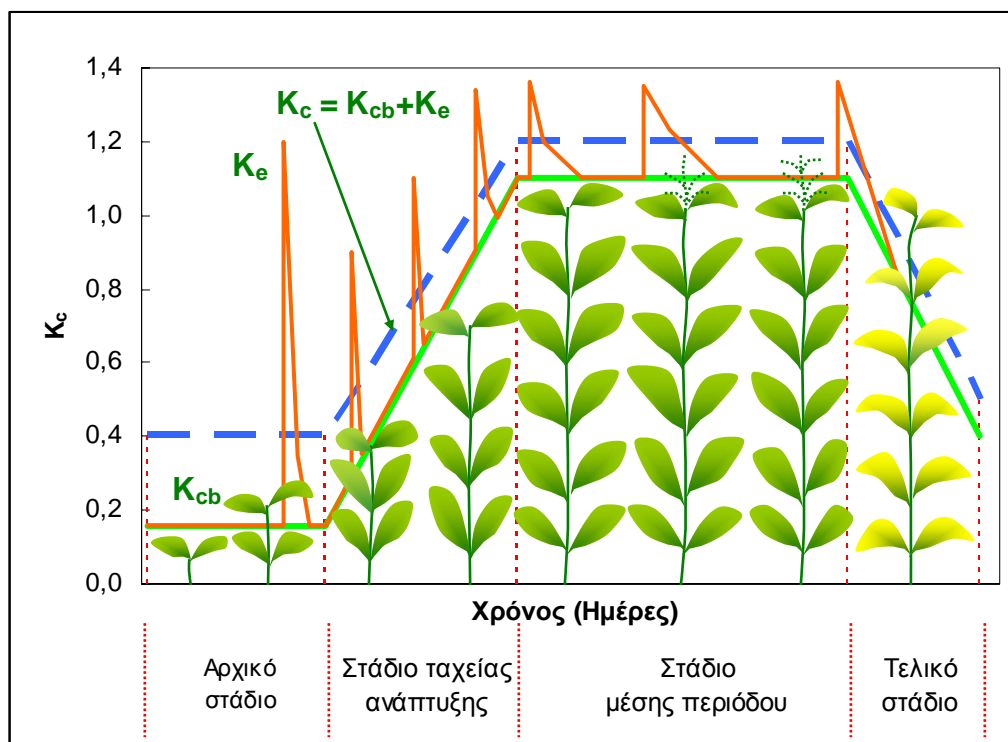
Η κατανομή των τιμών του φυτικού συντελεστή κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου δίνει την καμπύλη του φυτικού συντελεστή ή "καμπύλη καλλιέργειας". Η καμπύλη αυτή αντιπροσωπεύει τις επιπτώσεις της μεταβολής της φυλλικής επιφάνειας, του ύψους των φυτών, του ποσοστού κάλυψης του εδάφους, της αντίστασης του φυλλώματος στη μετακίνηση υδρατμών και θερμότητας και της ανακλαστικότητας του φυλλώματος, στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας σε σχέση με αυτή της καλλιέργειας αναφοράς.

Ο βασικός φυτικός συντελεστής, K_{cb} , περιγράφοντας μόνον την διαπνοή της καλλιέργειας, βρίσκεται κάτω από την τιμή του K_c (Εικόνα 4.5). Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στον K_c και τον K_{cb} εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου όταν η εξατμισοδιαπνοή συνίσταται κυρίως από την εξάτμιση και η διαπνοή είναι ακόμα μικρή. Όταν η φυτοκάλυψη είναι πλήρης ή σχεδόν πλήρης κατά τη διάρκεια του τρίτου

σταδίου, η εξάτμιση κάτω από το φύλλωμα έχει μικρή συνεισφορά στην εξατμισοδιαπνοή και η τιμή του K_{cb} σε αυτό το στάδιο είναι σχεδόν ίδια με αυτήν του K_c . Αναλόγως της συχνότητας άρδευσης της καλλιέργειας κατά το τελικό στάδιο, η τιμή του K_{cb} θα είναι ίδια (συχνή άρδευση) ή μικρότερη αυτής του K_c .

Η Εικόνα 4.5 παρουσιάζει τυπικές μορφές καμπυλών των K_{cb} , K_e και K_c . Η καμπύλη του K_{cb} αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο K_c για συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας και ξηρής εδαφικής επιφάνειας. Οι αιχμές του K_e αντιπροσωπεύουν την αύξηση της εξάτμισης όταν η εδαφική επιφάνεια έχει υγρανθεί από άρδευση ή βροχή και έτσι έχει αυξηθεί προσωρινά η συνολική E_T . Αυτές οι αιχμές μειώνονται καθώς η εδαφική επιφάνεια ξηραίνεται.

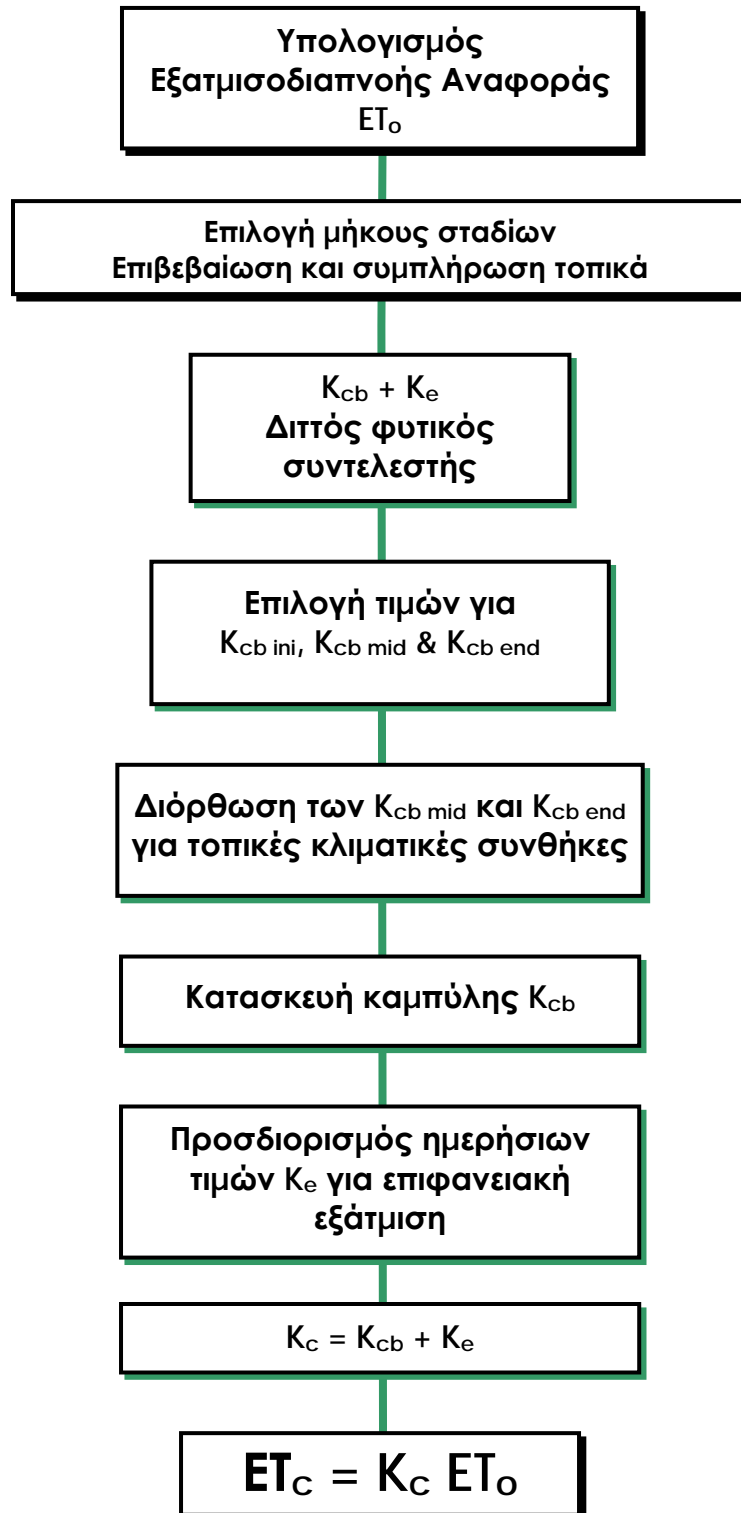
Αθροισμένες, οι τιμές των K_{cb} και K_e αντιπροσωπεύουν τον K_c . Η καμπύλη του K_c (η διακεκομμένη γραμμή) δείχνει την επίδραση της πρόσθεσης $K_{cb} + K_e$ στον χρόνο και εμφανίζεται ως μια ομαλή γραμμή. Αυτή η ομαλή γραμμή αντιπροσωπεύεται από την μέθοδο του απλού φυτικού συντελεστή. Η καμπύλη του K_c βρίσκεται επάνω από αυτή του K_{cb} , με τις μεγαλύτερες διαφορές να παρουσιάζονται κατά το αρχικό και το στάδιο ταχείας ανάπτυξης, σε σχέση πάντα με την συχνότητα ύγρυνσης του εδάφους.



Εικόνα 4.5: Καμπύλες φυτικού συντελεστή που δίνουν τον βασικό K_{cb} (πράσινη γραμμή), τον συντελεστή εξάτμισης K_e (κόκκινη γραμμή) και την αντίστοιχη καμπύλη του φυτικού συντελεστή $K_c = K_{cb} + K_e$ (διακεκομμένη γαλάζια γραμμή).

Διάγραμμα ροής των υπολογισμών

Η Εικόνα 4.6. παρουσιάζει με τη μορφή διαγράμματος ροής τις γενικές διαδικασίες υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας.



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα ροής που δείχνει την γενική διαδικασία υπολογισμού της ET_c.

4.4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ET_c

Αυτή η παράγραφος παρουσιάζει την διαδικασία πρόβλεψης της επίδρασης της διαβροχής στην τιμή του φυτικού συντελεστή K_c . Η επίλυση περιλαμβάνει τον διαχωρισμό του K_c σε δύο ξεχωριστούς συντελεστές, έναν για την διαπνοή της καλλιέργειας, ήτοι τον βασικό φυτικό συντελεστή (K_{cb}) και έναν για την εξάτμιση από το έδαφος (K_e). Δηλαδή:

$$K_{cb}ET_0 = \text{διαπνοή και } K_eET_0 = \text{εξάτμιση}$$

Έτσι:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_0 \quad [4:4]$$

Η προσέγγιση του διπλού φυτικού συντελεστή είναι πιο πολύπλοκη και πιο ευαίσθητη υπολογιστικώς από αυτήν του απλού φυτικού συντελεστή. Η διαδικασία εκτελέσθηκε σε ημερήσια βάση με τη χρήση υπολογιστή. Συστήνεται να ακολουθείται αυτή η διαδικασία όταν απαιτούνται βελτιωμένες εκτιμήσεις του K_c , παραδείγματος χάριν για τον προγραμματισμό άρδευσης αγροτεμαχίων σε ημερήσια βάση (Allen et al., 1998).

Διαπνοή ($K_{cb} ET_0$)

Βασικός φυτικός συντελεστής (K_{cb})

Ο βασικός φυτικός συντελεστής, K_{cb} , (basal crop coefficient) ορίζεται ως ο λόγος της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας προς την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_c/ET_0) όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι ξηρή αλλά υπάρχει διαπνοή σε έναν δυναμικό ρυθμό, δηλ. το νερό δεν περιορίζει την διαπνοή. Έτσι, ο όρος " $K_{cb} ET_0$ " αντιπροσωπεύει κυρίως τη διαπνοή. Ο " $K_{cb} ET_0$ " θεωρείται ότι περιλαμβάνει και μια υπολειμματική εξάτμιση που προέρχεται από το εδαφικό νερό κάτω από την ξηρή επιφάνεια και από το εδαφικό νερό κάτω από πυκνή βλάστηση (Allen et al., 1998).

Όπως οι τιμές του K_c περιελάμβαναν την μέση επίδραση της εξάτμισης από την εδαφική επιφάνεια, οι τιμές του K_{cb} κυμαίνονται κάτω από αυτές του K_c όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5. Συνιστώμενες τιμές για τον βασικό φυτικό συντελεστή K_{cb} δίδονται από το FAO 56 (Allen et al., 1998). Οι τιμές για τον K_{cb} που δίδονται στο FAO 56 αντιπροσωπεύουν έναν K_{cb} για ύψυγρο κλίμα και μέση ταχύτητα ανέμου. Για κλίματα όπου η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα RH_{min} διαφέρει από το 45% ή όπου η ταχύτητα ανέμου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από 2 m s^{-1} , όταν οι τιμές του βασικού φυτικού συντελεστή για το τρίτο και τέταρτο στάδιο ανάπτυξης ($K_{cb \text{ mid}}$ και $K_{cb \text{ end}}$

αντιστοίχως) είναι μεγαλύτερες από 0,45 πρέπει να διορθώνονται, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (Allen et al., 1998):

$$K_{cb} = K_{cb(\text{PIN})} + [0,04(U_2 - 2) - 0,004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h_c}{3} \right)^{0,3} \quad [4:5]$$

όπου:

$K_{cb(\text{PIN})}$ = η τιμή του βασικού φυτικού συντελεστή για το τρίτο στάδιο ανάπτυξης ($K_{cb \text{ mid}}$) ή του βασικού φυτικού συντελεστή για το τέταρτο στάδιο ανάπτυξης ($K_{cb \text{ end}}$), (αν $\geq 0,45$) ληφθείσα από το FAO 56,

U_2 = η μέση τιμή της ημερήσιας ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2 m επάνω από χόρτο κατά το στάδιο μέσης ή τελικής περιόδου ανάπτυξης για $1 \text{ m s}^{-1} \leq U_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$ (m s^{-1}),

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

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

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, μόνον τρεις σημειακές τιμές απαιτούνται για να περιγράψουν και να κατασκευάσουν την καμπύλη του φυτικού συντελεστή. Αφού διαιρεθεί η βλαστική περίοδος σε τέσσερα γενικά στάδια ανάπτυξης και επιλεγούν και διορθωθούν οι τιμές του K_{cb} που αντιστοιχούν στο αρχικό ($K_{cb \text{ ini}}$), στο μέσο ($K_{cb \text{ mid}}$) και στο τέλος του τελευταίου σταδίου ($K_{cb \text{ end}}$), η καμπύλη του φυτικού συντελεστή μπορεί να σχεδιαστεί και να παραχθούν οι τιμές του K_{cb} για οποιοδήποτε χρονικό σημείο.

Εξάτμιση (K_e ET_o)

Ο συντελεστής εξάτμισης από το έδαφος (K_e), περιγράφει το συνθετικό εξάτμισης της ET_c. Όταν το επιφανειακό έδαφος είναι υγρό, μετά από βροχή ή άρδευση, ο K_e είναι ο μέγιστος. Όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι ξηρή, ο K_e είναι μικρός ακόμα και μηδέν όταν δεν παραμένει νερό στην επιφάνεια του εδάφους για εξάτμιση.

Συντελεστής εξάτμισης (K_e)

Όταν το έδαφος είναι υγρό, η εξάτμιση από το έδαφος εμφανίζεται στον μέγιστο ρυθμό. Παρόλα αυτά, ο φυτικός συντελεστής ($K_c = K_{cb} + K_e$) δεν μπορεί ποτέ να υπερβεί μια μέγιστη τιμή, $K_{c \text{ max}}$. Αυτή η τιμή προσδιορίζεται από την διαθέσιμη για εξατμισοδιαπνοή ενέργεια στην επιφάνεια του εδάφους ($K_{cb} + K_e \leq K_{c \text{ max}}$), ή $K_e \leq (K_{c \text{ max}}$

– K_{cb}). Όταν το επιφανειακό έδαφος ξηραίνεται, λιγότερο νερό είναι διαθέσιμο για εξάτμιση και μια μείωση αυτής αρχίζει να εμφανίζεται σε αναλογία με το νερό που παραμένει στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα (Allen et al., 1998):

$$K_e = K_r(K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew}K_{cmax} \quad [4:6]$$

όπου:

K_e = ο συντελεστής εξάτμισης από το έδαφος,

K_{cb} = ο βασικός φυτικός συντελεστής,

K_{cmax} = η μέγιστη τιμή του K_c μετά από βροχόπτωση ή άρδευση,

K_r = αδιάστατος συντελεστής μείωσης της εξάτμισης που εξαρτάται από το αθροιστικό ύψος του νερού που εξαντλήθηκε (εξατμίσθηκε) από το επιφανειακό έδαφος,

f_{ew} = το τμήμα του εδάφους που εκτίθεται και διαβρέχεται.

Μετά από βροχή ή άρδευση ο K_r είναι 1 και η εξάτμιση καθορίζεται μόνον από την διαθέσιμη ενέργεια. Καθώς η επιφάνεια του εδάφους ξηραίνεται, ο K_r γίνεται μικρότερος της μονάδας και η εξάτμιση μειώνεται. Ο K_r γίνεται μηδέν όταν δεν έχει μείνει καθόλου νερό για εξάτμιση στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα.

Η εξάτμιση εμφανίζεται κυρίως από το εκτιθέμενο εδαφικό τμήμα, f_{ew} , το τμήμα του εδάφους που δεν καλύπτεται από βλάστηση και που υγραίνεται από άρδευση ή βροχόπτωση, δηλαδή, το τμήμα του εδάφους από το οποίο εμφανίζεται η περισσότερη εξάτμιση. Έτσι, η εξάτμιση περιορίζεται σε κάθε στιγμή από την διαθέσιμη ενέργεια στο εκτιθέμενο εδαφικό τμήμα, δηλαδή, ο K_e δεν μπορεί να υπερβεί το $f_{ew} K_{cmax}$.

Η διαδικασία υπολογισμού συνίσταται στον προσδιορισμό:

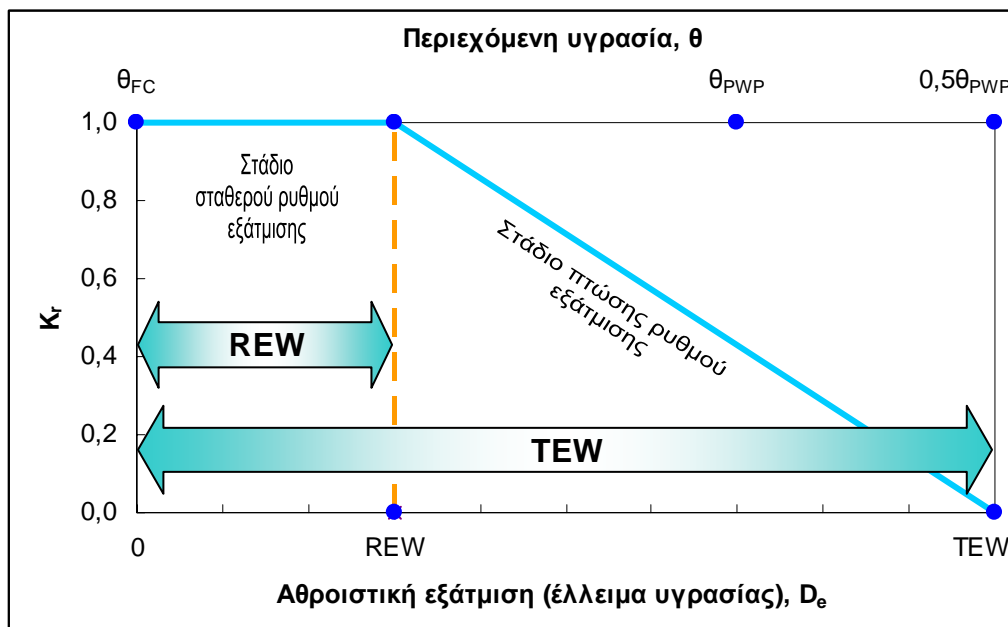
- ◆ του συντελεστή μείωσης της εξάτμισης από το έδαφος K_r ,
- ◆ του επάνω ορίου K_{cmax} , και
- ◆ του εδαφικού τμήματος που εκτίθεται και υγραίνεται f_{ew} .

Η εκτίμηση του K_r απαιτεί έναν ημερήσιο υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου για την επιφανειακή εδαφική στρώση.

Συντελεστής μείωσης εξάτμισης εδάφους (K_r)

Η εξάτμιση από το εκτιθέμενο έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια: ένα στάδιο σταθερού ρυθμού εξάτμισης (στάδιο 1) και ένα στάδιο πτώσης του ρυθμού εξάτμισης (στάδιο 2) (Εικόνα 4.7). Όταν η εδαφική επιφάνεια είναι υγρή, ο K_r είναι 1. Όταν η περιεχόμενη υγρασία περιορίζεται, ο K_r μειώνεται και γίνεται μηδέν όταν η

συνολική ποσότητα νερού που μπορεί να εξατμισθεί από το επιφανειακό έδαφος εξαντλείται.



Εικόνα 4.7: Ο συντελεστής μείωσης της εξάτμισης από το έδαφος, K_r . REW: ευκόλως εξατμίσιμο νερό, TEW: συνολικό εξατμίσιμο νερό.

Ο συντελεστής μείωσης εξάτμισης εδάφους, K_r , (soil evaporation reduction coefficient), υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (Allen et al., 1998):

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \text{ for } D_{e,i-1} > REW \quad [4:7]$$

όπου:

K_r = αδιάσπαστος συντελεστής μείωσης της εξάτμισης που εξαρτάται από την εξάντληση του εδαφικού νερού (αθροιστικό ύψος εξάτμισης) από την επιφανειακή εδαφική στρώση ($K_r = 1$ όταν $D_{e,i-1} \leq REW$),

$D_{e,i-1}$ = το αθροιστικό ύψος εξάτμισης (εξάντληση) από την επιφανειακή εδαφική στρώση κατά το τέλος της ημέρας $i-1$ (προηγούμενη ημέρα) (mm),

TEW = το μέγιστο αθροιστικό ύψος εξάτμισης από την επιφανειακή εδαφική στρώση όταν ο $K_r = 0$ (συνολικό εξατμίσιμο νερό) (mm),

REW = το αθροιστικό ύψος εξάτμισης κατά το τέλος του σταδίου 1 (ευκόλως εξατμίσιμο νερό) (mm), (αναλόγως του εδαφικού τύπου, FAO-56).

Στην διαδικασία εξάτμισης, θεωρείται πως η περιεχόμενη υγρασία της εξατμιζουσας

στρώσης του εδάφους βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα, θ_{FC} , λίγο μετά από μια διύγρυνση και πώς το έδαφος μπορεί να ξηραθεί έως σε ένα επίπεδο περιεχόμενης υγρασίας που βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ εδάφους ξηραθέντος στο πυραντήριο (καθόλου υπολειμματικό νερό) και σημείου μάρανσης, θ_{WP} . Η ποσότητα του νερού που μπορεί να εξαντληθεί από εξάτμιση κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ξήρανσης μπορεί έτσι να εκτιμηθεί ως (Allen et al., 1998):

$$TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0,5\theta_{WP}) Z_e \quad [4:8]$$

όπου:

TEW = το συνολικό εξατμίσιμο νερό, δηλαδή το μέγιστο ύψος νερού που μπορεί να εξατμισθεί από το έδαφος (mm),

θ_{FC} = η περιεχόμενη εδαφική υγρασία στην υδατοϊκανότητα ($m^3 m^{-3}$),

θ_{WP} = η περιεχόμενη εδαφική υγρασία στο σημείο μάρανσης ($m^3 m^{-3}$),

Z_e = το βάθος του επιφανειακού εδαφικού στρώματος που υπόκειται σε ξήρανση δια της εξάτμισης (0,10-0,15 m).

Όταν δεν είναι γνωστή, η τιμή για το Z_e , το αποτελεσματικό βάθος της στρώσης εξάτμισης, συνιστάται η τιμή 0,10 – 0,15 m (Allen et al., 1998).

Στην αρχή ενός κύκλου ξήρανσης, μετά από ικανή βροχή ή άρδευση, η περιεχόμενη υγρασία στο επιφανειακό έδαφος βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα και η ποσότητα νερού που εξαντλείται από την εξάτμιση (D_e), είναι μηδέν. Κατά το στάδιο 1 της διαδικασίας ξήρανσης, η εδαφική επιφάνεια παραμένει υγρή και θεωρείται πως η εξάτμιση από το έδαφος που εκτίθεται στην ατμόσφαιρα θα εμφανισθεί σε έναν μέγιστο ρυθμό που περιορίζεται μόνον από την διαθεσιμότητα ενέργειας. Αυτό το στάδιο διαρκεί μέχρι το αθροιστικό ύψος της εξάτμισης, D_e , είναι τέτοιο ώστε οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους να περιορίζονται και το νερό να μην μπορεί να μεταφερθεί στην εδαφική επιφάνεια σε έναν ρυθμό που να μπορεί να καλύπτει την δυναμική ζήτηση. Κατά το στάδιο 1, ο $K_r = 1$.

Το αθροιστικό ύψος της εξάτμισης (D_e), στο τέλος του σταδίου 1 ισούται με το ευκόλως εξατμίσιμο νερό REW (Readily Evaporative Water), το οποίο είναι το μέγιστο ύψος νερού που μπορεί να εξατμισθεί από την επιφανειακή εδαφική στρώση χωρίς περιορισμό κατά το στάδιο 1. Το ύψος αυτό συνήθως κυμαίνεται από 5 έως 15 mm και είναι γενικώς υψηλότερο στα μέσης και λεπτής υφής εδάφη (Allen et al., 1998).

Το δεύτερο στάδιο (όπου ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται) ονομάζεται «στάδιο πτώσης ρυθμού» εξάτμισης και αρχίζει όταν το D_e υπερβεί το REW. Σε αυτό το σημείο, η

εδαφική επιφάνεια είναι ορατώς ξηρή και η εξάτμιση από το εκτιθέμενο έδαφος μειώνεται σε αναλογία με τη ποσότητα του νερού που παραμένει στην επιφανειακή εδαφική στρώση (Allen et al., 1998):

Άνω όριο $K_{c\ max}$

Ο $K_{c\ max}$ αντιπροσωπεύει ένα ανώτερο όριο στην εξάτμιση και διαπνοή από οποιαδήποτε καλλιεργούμενη επιφάνεια και αντανακλά τους φυσικούς περιορισμούς που υπάρχουν στην διαθέσιμη ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από την διαφορά του ενεργειακού ισοζυγίου ($R_n - G - H$). Ο $K_{c\ max}$ κυμαίνεται από περίπου 1,05 έως 1,30 όταν χρησιμοποιείται η ET_0 αναφοράς χλοοτάπητα (Allen et al., 1998, 2000):

$$K_{c\ max} = \max \left\{ \left\{ 1,2 + [0,04(U_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h_c}{3} \right)^{0,3} \right\}, \{K_{cb} + 0,05\} \right\} \quad [4:9]$$

όπου:

h_c = το μέσο ύψος φυτών κατά την περίοδο των υπολογισμών (m),

K_{cb} = ο βασικός φυτικός συντελεστής,

$\max()$ = η μέγιστη από τις παραμέτρους στις αγκύλες { } που διαχωρίζονται με κόμμα.

Η Εξίσωση 4:9 διασφαλίζει ότι ο $K_{c\ max}$ είναι πάντα μεγαλύτερος ή ίσος με το άθροισμα $K_{cb} + 0,05$. Αυτή η προϋπόθεση υποδηλώνει ότι το υγρό έδαφος πάντα αυξάνει την τιμή του K_{cb} κατά 0,05 μετά από πλήρη διαβροχή της εδαφικής επιφάνειας, ακόμα και κατά περιόδους πλήρους εδαφοκάλυψης. Η τιμή 1,2 (αντί για 1) χρησιμοποιείται στην Εξίσωση 4:9 λόγω της επίδρασης της αυξημένης αεροδυναμικής αντίστασης των περιβαλλόντων καλλιεργειών κατά το μέσο και τελευταίο στάδιο ανάπτυξης, η οποία μπορεί να αυξήσει την τυρβώδη μεταφορά των υδρατμών από την εκτιθέμενη εδαφική επιφάνεια. Ο συντελεστής «1,2» περιλαμβάνει ακόμα και την επίδραση του μειωμένου albedo του υγρού εδάφους και την συνεισφορά της αποθηκευμένης θερμότητας στο ξηρό έδαφος πριν την διύγρανση του εδάφους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να συνεισφέρουν στην αυξημένη εξάτμιση σε σχέση με την αναφοράς.

Ο συντελεστής «1,2» αντιπροσωπεύει επίσης την επίδραση του εύρους ύγρυνσης που είναι μεγαλύτερο από 3 ή 4 ημέρες. Αν οι αρδεύσεις ή οι βροχοπτώσεις είναι πιο συχνές, παραδείγματος χάριν καθημερινά ή κάθε δύο ημέρες, τότε το έδαφος έχει μικρότερη ευκαιρία να απορροφήσει θερμότητα μεταξύ των υγρύνσεων και ο συντελεστής «1,2» μπορεί να μειωθεί σε περίπου 1,1 (Allen et al., 1998).

Εκτιθέμενο και διαβρεχόμενο εδαφικό τμήμα (f_{ew})

Σε καλλιέργειες με μη πλήρη εδαφοκάλυψη, η εξάτμιση από το έδαφος συχνά δεν εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια (έκταση), αλλά είναι μεγαλύτερη μεταξύ φυτών με μεγάλη έκθεση στην ηλιοφάνεια και όπου ο αερισμός είναι ικανός να μεταφέρει υδατμούς από την εδαφική επιφάνεια επάνω από το φύλλωμα. Αυτό είναι ακριβές ειδικότερα στην περίπτωση που μέρος της εδαφικής επιφάνειας υγραίνεται από την άρδευση.

Είναι αναγνωρισμένο πως η θέση και το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που εκτίθεται στην ηλιοφάνεια μεταβάλλονται αμφότερα σε κάποιο βαθμό με την ώρα της ημέρας και εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των γραμμών των φυτών. Η διαδικασία που παρουσιάζεται εδώ προβλέπει ένα γενικό μέσο τμήμα της εδαφικής επιφάνειας από το οποίο εμφανίζεται το μεγαλύτερο μέρος της εξάτμισης. Η εξάτμιση από το έδαφος κάτω από την φυτοκώμη της καλλιέργειας θεωρείται πως σε μεγάλο βαθμό περιλαμβάνεται στον βασικό συντελεστή K_{cb} .

Όταν ολόκληρη η επιφάνεια του εδάφους υγραίνεται ($f_{ew} = 1$), όπως συμβαίνει με τη **βροχή** ή τον **καταιονισμό** (Εικόνα 4.8), τότε το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας από όπου εμφανίζεται η περισσότερη εξάτμιση (f_{ew}), ορίζεται ουσιαστικά ως $(1 - f_c)$ όπου f_c είναι το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που καλύπτεται από βλάστηση και $(1 - f_c)$ είναι το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που εκτίθεται.

Παρά ταύτα, για **αρδευτικά συστήματα όπου υγραίνεται τμήμα της επιφάνειας** του αγρού, το f_{ew} πρέπει να περιορίζεται στο f_w , το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που υγραίνεται από άρδευση (Εικόνα 4.8), Έτσι, το f_{ew} υπολογίζεται ως (Allen et al., 1998):

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad [4:10]$$

όπου:

$1 - f_c$ = το μη φυτοκαλυμμένο (ή φυτοσκιασμένο) τμήμα εδάφους που εκτίθεται (0,01 – 1),

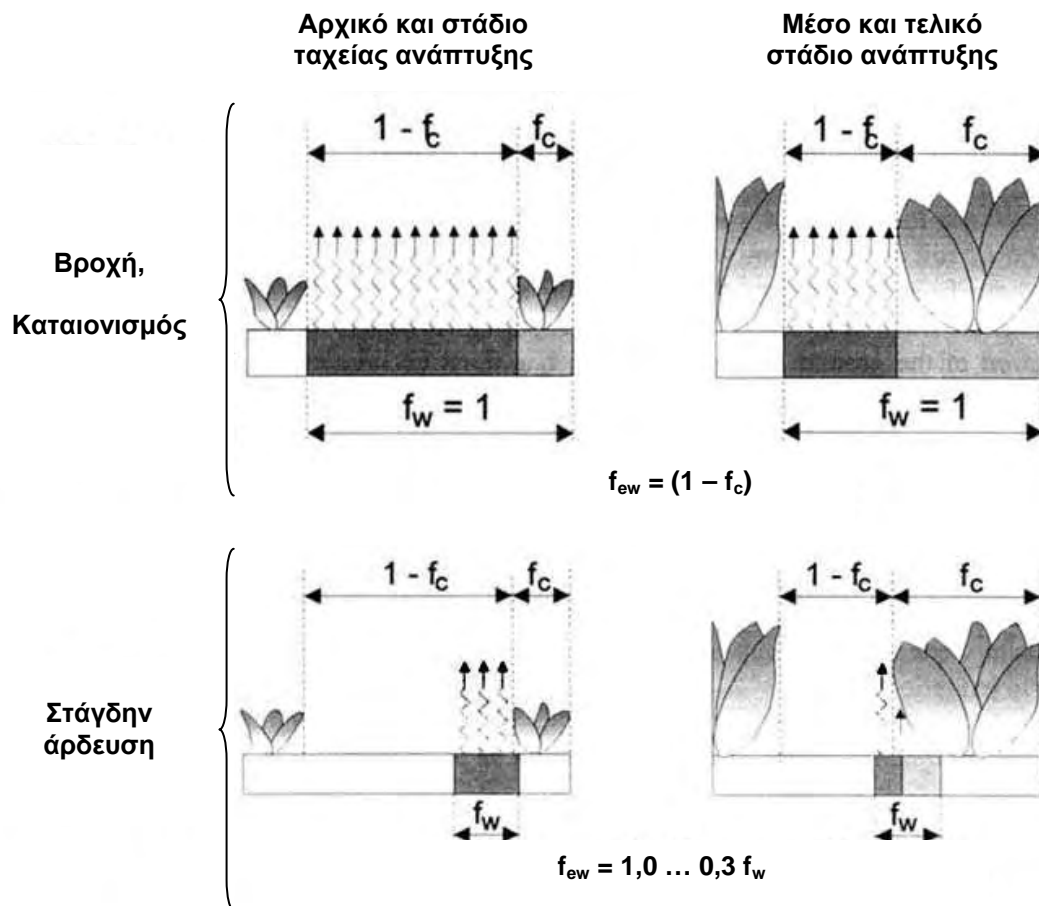
f_w = το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που διαβρέχεται από άρδευση ή βροχόπτωση (0,01 – 1).

Η συνάρτηση « $\min()$ » επιλέγει την χαμηλότερη τιμή μεταξύ των τιμών '1- f_c ' και ' f_w '. Η Εικόνα 4.8 απεικονίζει τη σχέση του f_{ew} με τα $(1 - f_c)$ και f_w .

Ο περιορισμός που επιβάλλεται από την Εξίσωση 4:10 είναι πως το τμήμα του εδάφους που υγραίνεται από άρδευση (f_w) εμφανίζεται μέσα στο τμήμα του εδάφους που εκτίθεται στην ηλιοφάνεια και στον αερισμό ($1 - f_c$). Αυτή είναι η συνήθης

περίπτωση, εκτός ίσως από κάποιες περιπτώσεις στάγδην άρδευσης.

Στην περίπτωση της **στάγδην**, όπου το μεγαλύτερο τμήμα του εδάφους που υγραίνεται από την άρδευση μπορεί να βρίσκεται υπό την φυτοκόμη και μπορεί συνεπώς να σκιάζεται, απαιτούνται περισσότερο πολύπλοκα μοντέλα της εδαφικής επιφάνειας και της μορφή διαβροχής για την ακριβή εκτίμηση της συνολικής εξάτμισης από το έδαφος. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή του f_w μπορεί να χρειάζεται να μειωθεί κατά το ήμισυ ή κατά ένα τρίτο αυτής για να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της σκίασης της επιφάνειας διαβροχής από την φυτοκόμη των φυτών στον ρυθμό εξάτμισης από το υγρανθέν έδαφος. Μια γενική προσέγγιση για την στάγδην άρδευση είναι ο πολλαπλασιασμός του f_w με $[1-(2/3)f_c]$ (Allen et al., 1998).



Εικόνα 4.8: Προσδιορισμός του f_{ew} (σκιασμένη περιοχή) σε σχέση με το τμήμα φυτοκάλυψης της επιφάνειας του εδάφους (f_c) και το τμήμα της διαβρεχόμενης επιφάνειας (f_w).

Όταν άρδευση και βροχή λαμβάνουν χώρα μέσα στην ίδια ημέρα, η τιμή του f_w επιλέγεται ανάλογα με το ύψος βροχής από κάθε πηγή νερού, δηλαδή μεταξύ του f_w για βροχή ($f_w = 1$) και του f_w για το αρδευτικό σύστημα.

Έτσι, για κάθε ημέρα, οι ακόλουθοι κανόνες εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό του f_w για αυτήν και τις επόμενες ημέρες με έναν απλοποιημένο τρόπο:

- ◆ Η επιφάνεια υγραίνεται από άρδευση και βροχή < 3 – 4 mm: το f_w είναι το f_w για το αρδευτικό σύστημα που χρησιμοποιείται. Δηλαδή αν είναι καταιονισμός $f_w=1$, αν είναι άρδευση με σταγόνα $f_w=0,5$.
- ◆ Η επιφάνεια υγραίνεται από άρδευση και βροχή > 3 – 4 mm: το f_w είναι 1,0 (βροχή),
- ◆ Η επιφάνεια υγραίνεται από άρδευση: το f_w είναι το f_w για το αρδευτικό σύστημα,
- ◆ Η επιφάνεια υγραίνεται από βροχή > 3 – 4 mm χωρίς άρδευση: το f_w είναι 1,0,
- ◆ Όπου δεν υπάρχει ούτε άρδευση ούτε σημαντική βροχή: το f_w είναι το f_w της προηγούμενης ημέρας.

Το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που καλύπτεται από βλάστηση ορίζεται ως f_c . Συνεπώς, το $(1 - f_c)$ αντιπροσωπεύει το τμήμα του εδάφους που εκτίθεται στην ηλιοφάνεια και στον αερισμό και το οποίο εξυπηρετεί το μεγαλύτερο μέρος της εξατμησης από το υγρό έδαφος. Η τιμή του f_c περιορίζεται σε <0,99.

Όπου το f_c δεν μετράται, μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης (Allen et al., 1998):

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right)^{(1+0,5h_c)} \quad [4:11]$$

όπου:

f_c = το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που είναι φυτοκαλυμμένη (0 – 0,99),

K_{cb} = η τιμή του βασικού φυσικού συντελεστή για την συγκεκριμένη ημέρα ή περίοδο,

K_{cmin} = ο ελάχιστος K_c για ξηρό έδαφος χωρίς φυτοκάλυψη ($\approx 0,15 - 0,20$),

K_{cmax} = ο μέγιστος K_c αμέσως μετά από διαβροχή,

h_c = το ύψος των φυτών (m).

Ο K_{cmin} είναι ο ελάχιστος φυτικός συντελεστής για ξηρό μη φυτοκαλυμμένο έδαφος όταν η εξατμισοδιαπνοή είναι κοντά στα επίπεδα αναφοράς. Συνιστάται μια τιμή $K_{cmin} \approx 0,15 - 0,20$. Η τιμή του K_{cmin} ενσωματώνει μέρος όλων των συντελεστών K_{cb} . Ο K_{cmin} κανονικά έχει την ίδια τιμή με αυτήν του $K_{cb\ ini}$ που χρησιμοποιείται για ετήσιες καλλιέργειες υπό συνθήκες σχεδόν μη φυτοκαλυμμένου εδάφους (0,15 - 0,20).

Η Εξίσωση 4:11 υποθέτει ότι η τιμή του K_{cb} επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που καλύπτεται από βλάστηση. Αυτό ισχύει για τις περισσότερες καλλιέργειες και συνθήκες. Ο εκθέτης “1+0,5h” στην εξίσωση

αντιπροσωπεύει την επίδραση του ύψους του φυτού στην σκίαση της επιφάνειας του εδάφους και στην αύξηση της τιμής του K_{cb} δεδομένης μια συγκεκριμένης τιμής του f_c . Η $K_{cb} - K_{c \min}$ περιορίζεται στο $\geq 0,01$ για υπολογιστικούς λόγους. Η τιμή του f_c μεταβάλλεται ημερησίως καθώς μεταβάλλεται ο K_{cb} . Για αυτό, η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε ημερήσια βάση.

Η εφαρμογή της Εξίσωσης 4:11 προβλέπει πως το f_c μειώνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου του 4^{ου} σταδίου σε αναλογία με τον K_{cb} , ακόμα και αν η επιφάνεια μπορεί να παραμένει καλυμμένη με γηρασμένη βλάστηση. Αυτή η θεώρηση βοηθά στα να λαμβάνονται υπόψη η τοπική μεταφορά της αισθητής θερμότητας από γηρασμένα φύλλα στην υποκείμενη αυτών εδαφική επιφάνεια (Allen et al., 1998).

Ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο

Η εκτίμηση του K_e απαιτεί τον υπολογισμό ενός ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα για τον υπολογισμό της αθροιστικής εξάτμισης (ή εξάντλησης της υγρασίας). Το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο για το εκτιθέμενο και διαβρεχόμενο εδαφικό τμήμα f_{ew} (Εικόνα 4.9) δίδεται ως (Allen et al., 1998):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad [4:12]$$

όπου:

$D_{e,i}$ = το αθροιστικό ύψος της εξάτμισης (εξάντληση) μετά από πλήρη διαβροχή κατά το τέλος της ημέρας i (mm),

$D_{e,i-1}$ = το αθροιστικό ύψος της εξάτμισης από το εκτιθέμενο και διαβρεχόμενο τμήμα του επιφανειακού εδάφους κατά το τέλος της ημέρας $i-1$ (mm),

P_i = η βροχόπτωση την ημέρα i (mm),

RO_i = η απορροή βροχόπτωσης από την εδαφική επιφάνεια την ημέρα i (mm),

I_i = το ύψος άρδευσης που διηθείται στο έδαφος την ημέρα i (mm),

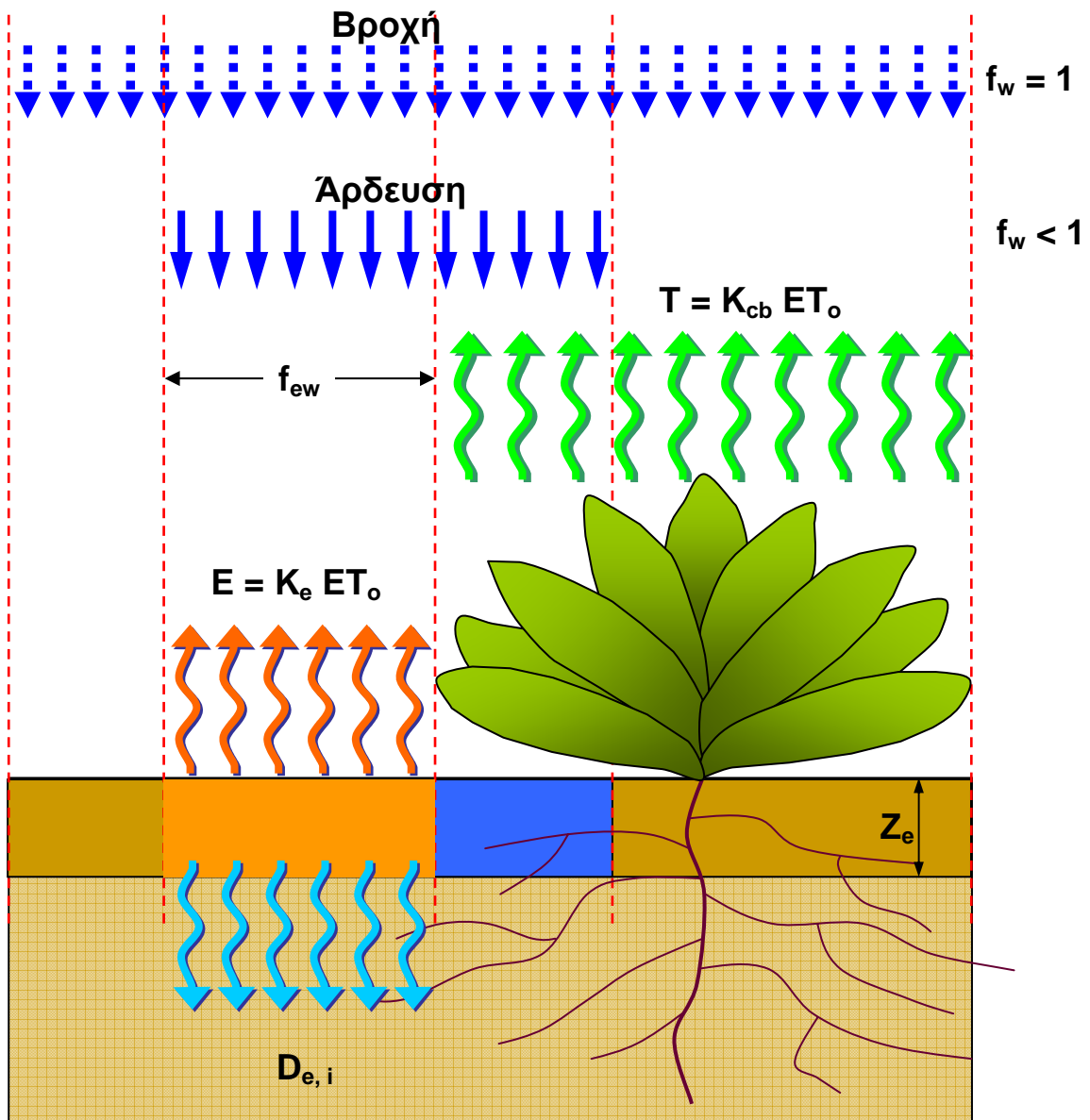
E_i = η εξάτμιση την ημέρα i (ήτοι, $E_i = K_e ET_o$) (mm),

$T_{ew,i}$ = το ύψος διαπνοής από το εκτιθέμενο και διαβρεχόμενο τμήμα του επιφανειακού εδαφικού στρώματος την ημέρα i (mm),

$DP_{e,i}$ = η απώλεια λόγω βαθιάς διήθησης από την επιφανειακή στρώση την ημέρα i αν η περιεχόμενη υγρασία υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα (mm),

f_w = το τμήμα της εδαφ. επιφάνειας που διαβρέχεται από άρδευση (0,01 – 1),

f_{ew} = το εκτιθέμενο και διαβρεχόμενο τμήμα εδάφους (0,01 – 1).



Εικόνα 4.9: Υδατικό ισοζύγιο του επιφανειακού στρώματος του εδάφους.

Όρια του $D_{e,i}$

Θεωρώντας πως το επιφανειακό έδαφος βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα μετά από ικανή βροχή ή άρδευση, η ελάχιστη τιμή για την εξάντληση $D_{e,i}$ είναι μηδέν. Καθώς η εδαφική επιφάνεια ξηραίνεται, η $D_{e,i}$ αυξάνεται και στην απουσία κάποιας διύγνωσης, θα φθάσει σταθερά την μέγιστη τιμή της, TEW (Εξίσωση 4:8). Τη στιγμή αυτή δεν έχει μείνει καθόλου νερό για εξάτμιση στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα, ο K_r γίνεται μηδέν και η τιμή της $D_{e,i}$ παραμένει στο TEW έως ότου το επιφανειακό έδαφος υγρανθεί ξανά. Τα όρια που επιβάλλονται στην $D_{e,i}$ είναι κατά συνέπεια (Allen et al., 1998):

$$0 \leq D_{e,i} \leq TEW \tag{4:13}$$

Αρχική εξάντληση

Για να ξεκινήσει το υδατικό ισοζύγιο για την εξατμίζουσα στρώση, θεωρήθηκε ότι το επιφανειακό έδαφος βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα μετά από μια ικανή βροχή ή άρδευση, δηλαδή $D_{e, i-1} = 0$. Αν έχει περάσει μια μακρά χρονική περίοδος από την τελευταία διύγρανση, θεωρείται πως όλο το εξατμίσιμο νερό έχει εξαντληθεί από την εξατμίζουσα στρώση (στην έναρξη των υπολογισμών), δηλαδή $D_{e, i-1} = TEW$.

Βροχόπτωση και απορροή

Η ημερήσια βροχόπτωση, P_i , με ύψος μικρότερο από περίπου $0,2ET_0$ εξατμίζεται εξολοκλήρου και αγνοήθηκε στους υπολογισμούς του K_e και του υδατικού ισοζυγίου (Allen et al., 1998). Η ποσότητα της βροχής που χάνεται από απορροή εξαρτάται από την ένταση της βροχής, την κλίση του αγρού, τον τύπο του εδάφους και τις υδραυλικές του ιδιότητες, την περιεχόμενη πριν την βροχή υγρασία καθώς και από την εδαφοκάλυψη. Γενικώς, η RO_i μπορεί να θεωρηθεί μηδέν ή μπορεί να ληφθεί υπόψη ως ποσοστό της P_i . Αυτό είναι ακριβές ειδικότερα για το υδατικό ισοζύγιο του επιφανειακού εδάφους, από τη στιγμή που σχεδόν όλες οι βροχοπτώσεις που έχουν εντάσεις ή ύψη αρκετά μεγάλα για να προκαλέσουν απορροή, αναπληρώνουν την περιεχόμενη υγρασία στο επιφανειακό στρώμα έως την υδατοϊκανότητα. Για αυτό, η απορροή μπορεί να αγνοηθεί (Allen et al., 1998).

Άρδευση

Γενικά εκφράζεται ως το μέσο διηθούμενο ύψος άρδευσης κατανεμημένο σε ολόκληρο τον αγρό. Για αυτό, χρησιμοποιείται ο λόγος I_i/f_w για να περιγράψει την ποσότητα νερού στο τμήμα του εδάφους που υγραίνεται (Εικόνα 4:9).

Η μεθοδολογία που παρατίθεται από το FAO-56 δεν πραγματεύεται την περίπτωση της μεθόδου άρδευσης με υπόγεια σταγόνα. Στην παρούσα έρευνα, κατά την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου στο επιφανειακό στρώμα, στην περίπτωση της ΥΣΑ, ο λόγος I_i/f_w θεωρήθηκε μηδέν αφού το νερό από την υπόγεια – τοποθετημένη σε βάθος 45 cm – πηγή δεν διέβρεχε το επιφανειακό στρώμα. Η θεώρηση αυτή, βασίσθηκε κατά τον σχεδιασμό στα αποτελέσματα δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών (Phene, 1995b, Camp, 1998, Ayars et al., 1999) και επιβεβαιώθηκε κατά την εφαρμογή, με τη λήψη μετρήσεων υγρασίας και την οπτική παρατήρηση στα αρδευόμενα με ΥΣΑ τεμάχια του πειραματικού αγρού.

Εξάτμιση

Η εξάτμιση κάτω από την φυτοκόμη θεωρείται πως περιλαμβάνεται στον K_{cb} και για αυτό δεν ποσοτικοποιείται ξεχωριστά. Η υπολογισμένη εξάτμιση αναφέρεται στο εκτιθέμενο, διαβρεχόμενο έδαφος. Η εξάτμιση E_i δίδεται από το γινόμενο $K_e ETo$. Ο λόγος E_i/f_{ew} περιγράφει την εξάτμιση στο τμήμα του εδάφους που εκτίθεται και υγραίνεται.

Διαπνοή

Εκτός από επιπολαιόριζες καλλιέργειες (δηλαδή όπου το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος είναι $< 0,5 - 0,6$ m), η ποσότητα της διαπνοής από την εξατμίζουσα εδαφική στρώση είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί (δηλ. $T_{ew} = 0$).

Για γραμμικές καλλιέργειες, το περισσότερο από το νερό που προσλαμβάνουν οι ρίζες προέρχεται από το έδαφος που καλύπτεται από το φύλλωμα. Έτσι, το T_{ew} ως τμήμα του f_{ew} μπορεί να θεωρηθεί μηδέν σε αυτήν την περίπτωση (Allen et al., 1998).

Βαθειά διήθηση

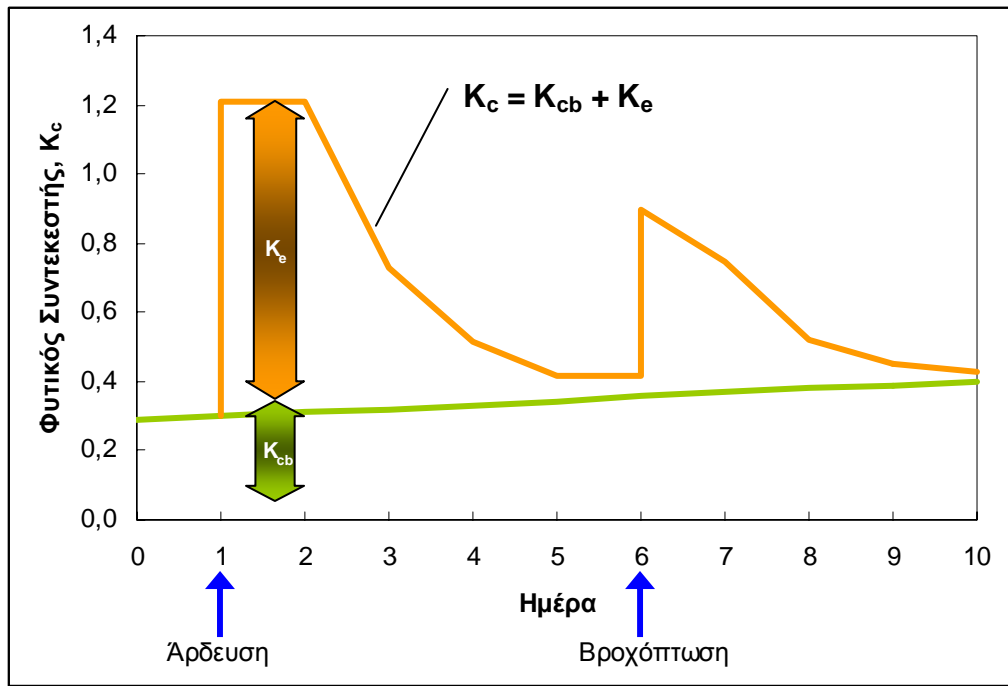
Μετά από ικανή βροχή ή άρδευση, η περιεχόμενη εδαφική υγρασία στο επιφανειακό έδαφος (στρώμα Z_e) μπορεί να υπερβεί την υδατοϊκανότητα. Παρά ταύτα, σε αυτή τη διαδικασία θεωρείται πως η περιεχόμενη εδαφική υγρασία βρίσκεται στην θ_{FC} σχεδόν αμέσως μετά από μια βροχή ή άρδευση, έτσι ώστε η εξάντληση $D_{e,i}$ στην Εξίσωση 4:14 να είναι μηδέν.

Μετά από βροχή ή άρδευση, η στραγγίση (διήθηση) του νερού από το επιφανειακό στρώμα υπολογίζεται ως (Allen et al., 1998):

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad [4:14]$$

Όσο η περιεχόμενη υγρασία στην εξατμίζουσα στρώση είναι κάτω από την υδατοϊκανότητα (δηλ. $D_{e,i} > 0$), το έδαφος δεν στραγγίζει και η $DP_{e,i} = 0$.

Στην Εικόνα 4.10, παρουσιάζεται μια τυπική μεταβολή του φυτικού συντελεστή όπως υπολογίζεται σε ημερήσια βάση ως συνίσταται από τον βασικό φυτικό συντελεστή (K_{cb}) και τον συντελεστή εξάτμισης (K_e) που υπολογίσθηκε μέσω του υδατικού ισοζυγίου η διακύμανση του οποίου οφείλεται στην διαβροχή του εδάφους.



Εικόνα 4.10: Επίδραση της διαβροχής του εδάφους στον φυτικό συντελεστή.

Βήματα υπολογισμού της ET_c

Ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά φύλλα (MSExcel). Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των ακόλουθων παραμέτρων:

α. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_0 :

Προσδιορισμός της ET_0 : η διαδικασία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

β. Στάδια ανάπτυξης:

Προσδιορίσθηκε η τοπική διορθωμένη διάρκεια των τεσσάρων σταδίων ανάπτυξης:

- διάρκεια αρχικού σταδίου: L_{ini} , (ημέρες),
- διάρκεια σταδίου ανάπτυξης: L_{dev} , (ημέρες),
- διάρκεια μέσου σταδίου: L_{mid} , (ημέρες),
- διάρκεια τελικού σταδίου: L_{late} , (ημέρες).

γ. Βασικός φυτικός συντελεστής, K_{cb} :

Υπολογίσθηκε ο βασικός φυτικός συντελεστής για κάθε ημέρα της βλαστικής περιόδου:

- επιλέχθηκαν τιμές του βασικού φυτικού συντελεστή για το αρχικό ($K_{cb\ ini}$) για το μέσο ($K_{cb\ mid}$) και για το τελικό στάδιο ($K_{cb\ end}$) από το FAO 56,
- διορθώθηκαν οι τιμές $K_{cb\ mid}$ και $K_{cb\ end}$ για τοπικές κλιματικές συνθήκες (Εξ. 4:5),
- υπολογίσθηκαν οι ημερήσιες τιμές του K_{cb} .

δ. Συντελεστής εξάτμισης, K_e :

Υπολογίσθηκε η μέγιστη τιμή του K_c , δηλαδή το άνω όριο $K_{c \max}$ (Εξίσωση 4:9), και προσδιορίσθηκε για κάθε ημέρα της βλαστικής περιόδου:

- το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας που καλύπτεται από βλάστηση, f_c (Εξίσωση 4:11),
- το τμήμα της εδαφικής επιφάνειας από το οποίο εμφανίζεται η περισσότερη εξάτμιση, f_{ew} (Εξίσωση 4:10),
- το αθροιστικό έλλειμμα από την εξατμίζουσα εδαφική στρώση (D_e), μέσω του ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου του επιφανειακού εδάφους (Εξίσωση 4:12),
- ο αντίστοιχος συντελεστής μείωσης της εξάτμισης, K_r (Εξίσωση 4:7), και
- ο συντελεστής εξάτμισης από το έδαφος, K_e (Εξίσωση 4:6).

ε. Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, ET_c :

Υπολογίσθηκε η $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o$ (Εξίσωση 4:4).

4.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ (ET_{ACT})4.5.1. ET_c ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

Όταν το έδαφος είναι υγρό, το νερό έχει υψηλή δυναμική ενέργεια, είναι σχετικώς ελεύθερο να κινηθεί και προσλαμβάνεται εύκολα από τις ρίζες των φυτών. Σε ξηρά εδάφη, το νερό έχει χαμηλή δυναμική ενέργεια και συγκρατείται δυνατά από το έδαφος και είναι λιγότερο εύκολο να προσληφθεί από την καλλιέργεια. Όταν η δυναμική ενέργεια του εδαφικού νερού πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή, η καλλιέργεια θεωρείται πως υπόκειται σε υδατική καταπόνηση. Οι επιπτώσεις της υδατικής καταπόνησης περιγράφονται πολλαπλασιάζοντας τον βασικό φυτικό συντελεστή με τον συντελεστή υδατικής καταπόνησης, K_s , (water stress coefficient), (Allen et al., 1998, Allen, 2000):

$$ET_{cACT} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad [4:15]$$

Για συνθήκες περιορισμένης εδαφικής υγρασίας, ο $K_s < 1$. Όταν δεν υπάρχει υδατική καταπόνηση, ο $K_s = 1$.

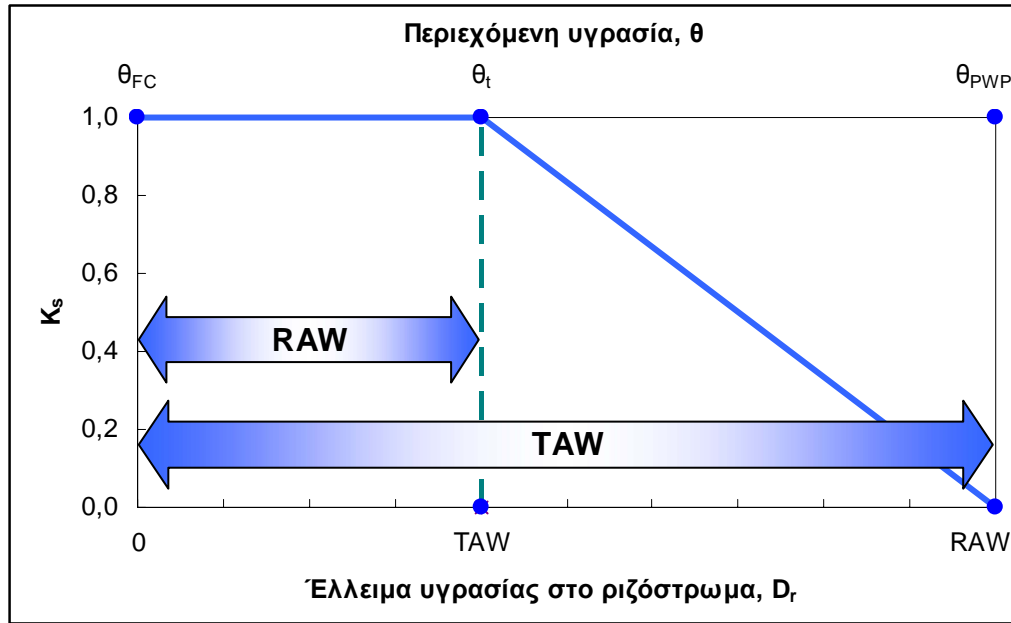
Ο K_s περιγράφει την επίδραση της υδατικής καταπόνησης στην διαπνοή της καλλιέργειας. Όταν χρησιμοποιείται ο απλός φυτικός συντελεστής, η επίδραση της υδατικής καταπόνησης περιλαμβάνεται στον K_c ως ($K_s K_{cb}$). Επειδή ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης επιδρά μόνον στην διαπνοή, παρά στην εξάτμιση από το έδαφος, η εφαρμογή του χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 4:15 είναι γενικώς πιο έγκυρη από την εφαρμογή με τη χρήση του απλού φυτικού συντελεστή (Allen et al., 1998).

4.5.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ (K_s)

Οι επιπτώσεις της υδατικής καταπόνησης στην ET της καλλιέργειας περιγράφονται μειώνοντας την τιμή του φυτικού συντελεστή. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τον φυτικό συντελεστή με τον συντελεστή υδατικής καταπόνησης (K_s), (Εξίσωση 4:15).

Η περιεχόμενη υγρασία στο ριζόστρωμα μπορεί επίσης να εκφραστεί με το έλλειμμα υγρασίας σε αυτό (D_r), δηλ. την εξάντληση του εδαφικού νερού με βάση την υδατοϊκανότητα. Στην υδατοϊκανότητα η εξάντληση είναι μηδέν ($D_r = 0$). Όταν χάνεται εδαφικό νερό από εξατμισοδιαπνοή, η εξάντληση αυξάνεται και προκαλείται καταπόνηση όταν η D_r γίνεται ίση με την ωφέλιμη υγρασία RAW (readily available water). Αφού η εξάντληση στο ριζόστρωμα υπερβεί την RAW (η περιεχόμενη υγρασία πέφτει κάτω από το κάτω όριο της ωφέλιμης, θ_i), η εξάντληση είναι αρκετά υψηλή και

περιορίζει την εξατμισοδιαπνοή σε μικρότερες των δυναμικών τιμών και έτσι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αρχίζει να μειώνεται σε αναλογία με την ποσότητα του νερού που παραμένει στο ριζόστρωμα (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Συντελεστής υδατικής καταπόνησης, K_s . RAW = Διαθέσιμη υγρασία, TAW = Ωφέλιμη υγρασία.

Όταν το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας είναι μικρότερο από την RAW τότε ο $K_s = 1$. Όταν η εξάντληση υπερβαίνει την ωφέλιμη υγρασία ($D_r > RAW$), ο K_s δίδεται από (Allen et al., 1998):

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - \rho)TAW} \quad [4:16]$$

όπου:

K_s = αδιάστατος παράγοντας μείωσης της διαπνοής που εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία (0 – 1),

D_r = το έλλειμμα (εξάντληση) εδαφικής υγρασίας (mm),

TAW = η διαθέσιμη εδαφική υγρασία στη ζώνη του ριζοστρώματος (mm),

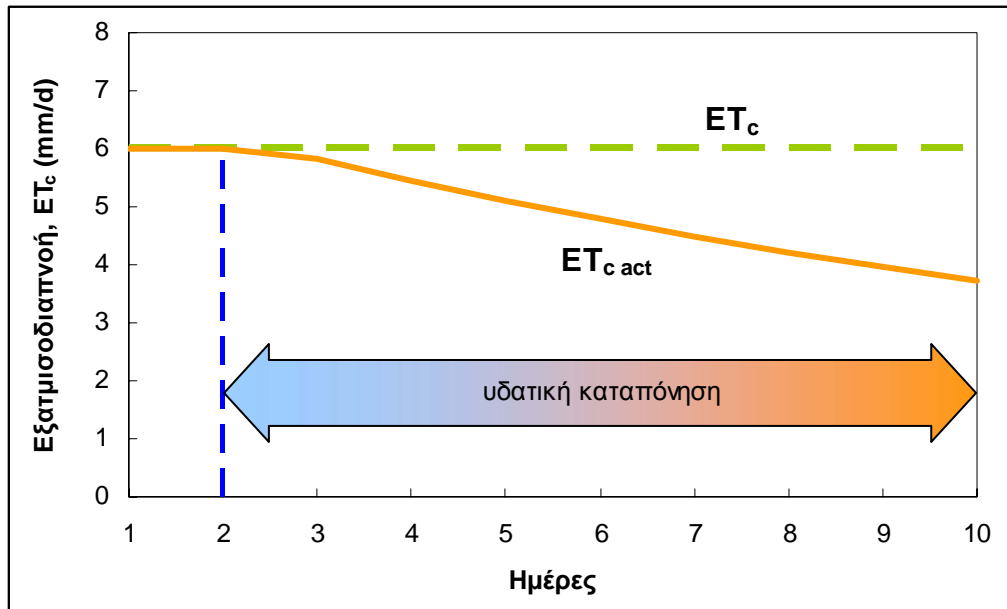
ρ = ο συντελεστής ωφελιμότητας (0 – 1).

Μετά τον υπολογισμό του K_s , η πραγματική εξατμισοδιαπνοή $ET_{c, ACT}$ υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 4:15.

Η μείωση της εξατμισοδιαπνοής σε αναλογία με την εξάντληση της εδαφικής υγρασίας που παραμένει στο ριζόστρωμα παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα

104 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

4.12, όπου φαίνεται η διαφοροποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET_c act) σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c).



Εικόνα 4.12: Η επίδραση της υδατικής καταπόνησης στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας.

4.5.3. ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (TAW)

Η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού αναφέρεται στην ικανότητα ενός εδάφους να συγκρατεί νερό διαθέσιμο στα φυτά. Μετά από ικανή βροχόπτωση ή άρδευση, το έδαφος θα στραγγίσει έως ότου φθάσει στην υδατοϊκανότητα (field capacity, FC). Αν δεν προστεθεί νέο, το περιεχόμενο νερό στο ριζόστρωμα μειώνεται ως αποτέλεσμα της πρόσληψης νερού από την καλλιέργεια. Καθώς η πρόσληψη νερού προοδεύει, το εναπομείναν νερό συγκρατείται στα εδαφικά τεμαχίδια με μεγαλύτερη δύναμη, μειώνεται η δυναμική του ενέργεια και καθίσταται περισσότερο δύσκολο για τα φυτά να το προσλάβουν. Τελικά, φθάνεται ένα σημείο όπου η καλλιέργεια δεν μπορεί πλέον να προσλαμβάνει το εναπομείναν νερό. Η πρόσληψη νερού γίνεται μηδέν όταν φθάνεται το σημείο μάρανσης (wilting point, WP).

Καθώς το περιεχόμενο νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα δεν μπορεί να συγκρατηθεί και στραγγίζει και καθώς το περιεχόμενο νερό κάτω από το σημείο μάρανσης δεν μπορεί να προσληφθεί από τα φυτά, το συνολικό διαθέσιμο νερό στο ριζόστρωμα είναι η διαφορά μεταξύ περιεχόμενου νερού στην υδατοϊκανότητα και στο σημείο μάρανσης (Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου, 1999):

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad [4:17]$$

όπου:

TAW = η διαθέσιμη εδαφική υγρασία στη ζώνη του ριζοστρώματος (mm),

θ_{fc} = η υγρασία στην υδατοϊκανότητα ($m^3 m^{-3}$),

θ_{wp} = η υγρασία στο σημείο μάρανσης ($m^3 m^{-3}$),

Z_r = το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος της καλλιέργειας (m).

Η διαθέσιμη υγρασία (total available water, TAW) δηλαδή είναι η ποσότητα του νερού που μια καλλιέργεια μπορεί να προσλάβει από το ριζόστρωμά της και το μέγεθός του εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και το βάθος του ριζοστρώματος (Παπαζαφειρίου, 1999).

Ωφέλιμη υγρασία (RAW)

Το μέρος της διαθέσιμης υγρασίας (TAW) που ένα φυτό μπορεί να προσλάβει χωρίς να υποστεί καταπόνηση είναι η ευκόλως διαθέσιμη ή ωφέλιμη υγρασία:

$$RAW = \rho TAW \quad [4:18]$$

όπου:

RAW = η ωφέλιμη υγρασία (mm),

ρ = ο συντελεστής ωφελιμότητας (0 – 1).

Ο συντελεστής ωφελιμότητας ορίζει το μέρος της διαθέσιμης υγρασίας (TAW) που ένα φυτό μπορεί να προσλάβει χωρίς να υποστεί υδατική καταπόνηση (Παπαζαφειρίου, 1999).

Ισοζύγιο Εδαφικού νερού

Η εκτίμηση του K_s απαιτεί τον υπολογισμό ενός ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου για το ριζόστρωμα. Σχηματικά (Εικόνα 4.13) το ριζόστρωμα μπορεί να παρουσιασθεί ως ένα δοχείο μέσα στο οποίο το περιεχόμενο νερό μπορεί να κυμαίνεται. Η έκφραση του περιεχόμενου νερού ως έλλειμμα υγρασίας στο ριζόστρωμα είναι χρήσιμη. Κάνει την πρόσθεση ή την αφαίρεση των απωλειών ή κερδών απλούστερα καθώς οι διάφορες παράμετροι του ισοζυγίου του εδαφικού νερού συνήθως εκφράζονται με όρους πάχους νερού. Η βροχόπτωση, η άρδευση και η τριχοειδής ανύψωση του υπογείου νερού προς το ριζόστρωμα προσθέτουν νερό σε αυτό και μειώνουν το έλλειμμα. Η εξάτμιση από το έδαφος, η διαπνοή των φυτών και οι απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης απομακρύνουν νερό από το ριζόστρωμα και αυξάνουν το έλλειμμα.

Το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο, εκφρασμένο σε όρους ελλείμματος είναι:

106 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad [4:19]$$

όπου:

$D_{r,i}$ = το έλλειμμα στο ριζόστρωμα κατά το τέλος της ημέρας i (mm),

$D_{r,i-1}$ = το περιεχόμενο νερό στο ριζόστρωμα κατά το τέλος της προηγούμενης ημέρας $i-1$ (mm),

P_i = η βροχόπτωση την ημέρα i (mm),

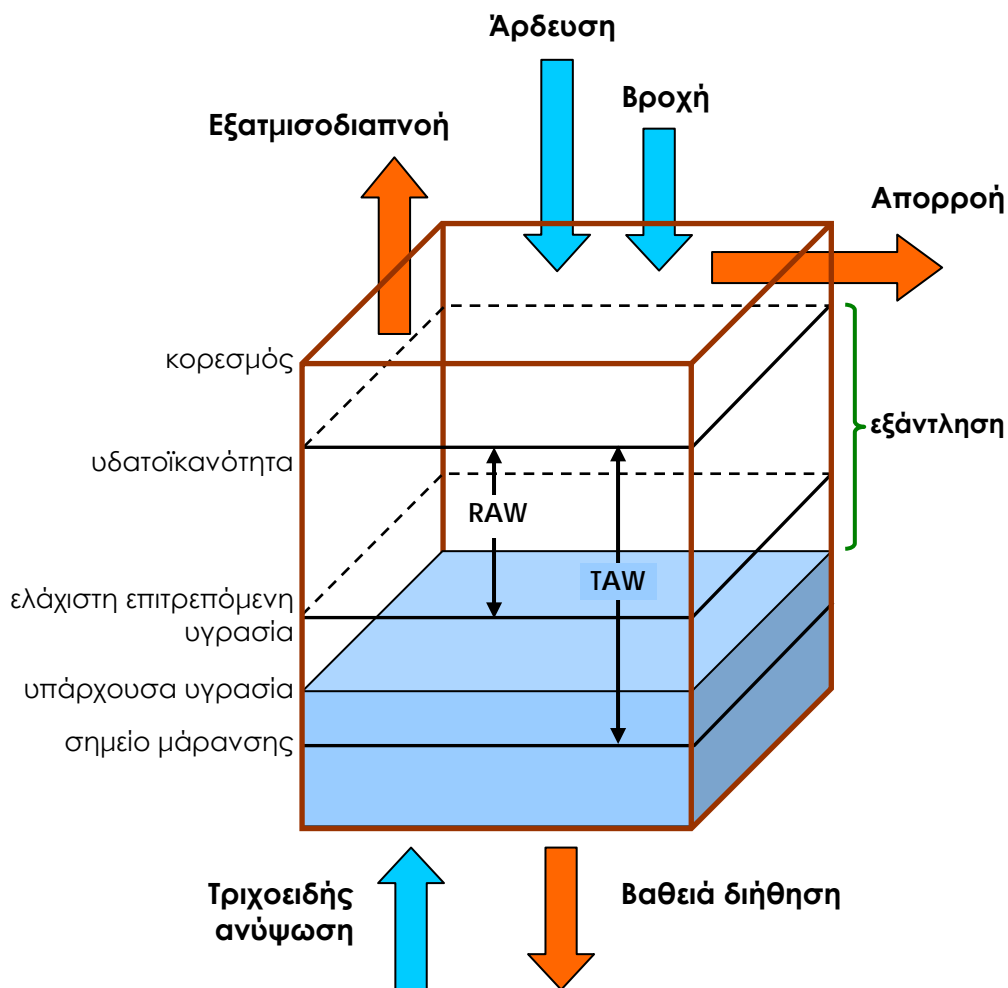
RO_i = η απορροή από την εδαφική επιφάνεια την ημέρα i (mm),

I_i = το καθαρό ύψος άρδευσης που διηθείται στο έδαφος την ημέρα i (mm),

CR_i = η τριχοειδής ανύψωση από την υπόγεια στάθμη την ημέρα i (mm),

$ET_{c,i}$ = η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας την ημέρα i (mm),

DP_i = η απώλεια νερού από το ριζόστρωμα λόγω βαθιάς διήθησης την ημέρα i (mm).



Εικόνα 4.13: Υδατικό ισοζύγιο στο ριζόστρωμα.

Όρια του $D_{r,i}$

Στην Εικόνα 4.13 φαίνεται ότι νερό μπορεί να αποθηκευτεί στο ριζόστρωμα έως την υδατοϊκανότητα. Μολονότι μετά από βροχή ή άρδευση το περιεχόμενο νερό μπορεί προσωρινά να υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα, η συνολική ποσότητα του νερού πάνω από την υδατοϊκανότητα θεωρείται πως χάνεται την ίδια ημέρα λόγω βαθιάς διήθησης. Θεωρώντας ότι το ριζόστρωμα βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα μετά από βροχή ή άρδευση, η ελάχιστη τιμή για την εξάντληση $D_{r,i}$ είναι μηδέν. Ως αποτέλεσμα της βαθιάς διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής, το περιεχόμενο νερό στο ριζόστρωμα θα μειωθεί βαθμηδόν και το έλλειμμα θα αυξηθεί. Στην απουσία κάποιου γεγονότος ύγρυνσης, το περιεχόμενο νερό σταθερά θα φθάσει στην ελάχιστη τιμή του θ_{wp} . Σε αυτό το σημείο δεν έχει μείνει καθόλου νερό για εξατμισοδιαπνοή στο ριζόστρωμα, ο K_s γίνεται μηδέν και το έλλειμμα έχει φθάσει την μέγιστη τιμή του (TAW). Τα όρια του $D_{r,i}$ είναι κατά συνέπεια:

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW \quad [4:20]$$

Αρχική εξάντληση

Για να ξεκινήσει το υδατικό ισοζύγιο για το ριζόστρωμα, εκτιμάται η αρχική εξάντληση $D_{r,i-1}$. Η αρχική εξάντληση μπορεί να προκύψει από μέτρηση του περιεχόμενου εδαφικού νερού από:

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1})Z_r \quad [4:21]$$

όπου:

θ_{i-1} = το μέσο περιεχόμενο εδαφικό νερό στο ενεργό ριζόστρωμα.

Μετά από μια ικανή βροχή ή άρδευση, μπορεί να θεωρηθεί ότι το ριζόστρωμα βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα, δηλαδή $D_{r,i-1} = 0$.

Βροχόπτωση, απορροή και άρδευση

Ημερήσιες βροχοπτώσεις με ποσοότητες μικρότερες από περίπου 0,2ΕΤ₀, εξατμίζονται εξολοκλήρου και μπορούν να αγνοηθούν κατά τους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου. Το l_i είναι ισοδύναμο με το μέσο διηθούμενο ύψος άρδευσης καταμεμημένο σε ολόκληρη την επιφάνεια του αγρού (Allen et al., 1998).

Τριχοειδής ανύψωση

Η ποσότητα του νερού που μεταφέρεται προς τα επάνω μέσω της τριχοειδούς ανύψωσης (capillary rise, CR) από την υπόγεια στάθμη εξαρτάται από τον τύπο του

εδάφους, το βάθος της υπόγειας στάθμης και την υγρασία του ριζοστρώματος. Η CR θεωρήθηκε μηδέν αφού δεν ανιχνεύτηκε υπόγεια στάθμη σε βάθος έως και 2 m σε δύο φρεάτια παρατήρησης που διανοίχτηκαν στον πειραματικό αγρό για το σκοπό αυτό.

Εξατμισοδιαπνοή

Όταν το έλλειμμα του εδαφικού νερού είναι μικρότερο από το RAW, τότε $K_s = 1$ και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ισούται $ET_c = K_c ET_o$. Από τη στιγμή που η $D_{r,i}$ υπερβαίνει το RAW, η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας μειώνεται και η ET_c υπολογίζεται από την Εξίσωση 4:15.

Βαθεία διήθηση

Μετά από βροχή ή άρδευση, η περιεχόμενη εδαφική υγρασία στο ριζόστρωμα μπορεί να υπερβεί την υδατοϊκανότητα. Σε αυτήν την διαδικασία θεωρείται πως η περιεχόμενη εδαφική υγρασία βρίσκεται στην θ_{FC} την ίδια ημέρα με την άρδευση (ή βροχή), έτσι ώστε η εξάντληση D_r στην Εξίσωση 4:22 γίνεται μηδέν. Για αυτό, μετά από ικανή βροχή ή άρδευση:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad [4:22]$$

Όσο η περιεχόμενη υγρασία στο ριζόστρωμα είναι κάτω από την υδατοϊκανότητα (δηλ. $D_r > 0$), το έδαφος δεν στραγγίζει και η $DP_i = 0$.

Ο όρος DP_i στις Εξισώσεις 4:19 και 4:22 δεν πρέπει να συγχέεται με τον όρο $DP_{e,i}$ που χρησιμοποιείται στις Εξισώσεις 4:12 και 4:14 για την εξατμίζουσα στρώση. Και οι δύο όροι υπολογίζονται ταυτοχρόνως, αλλά είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.

4.5.4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ

Άρδευση απαιτείται όταν η βροχόπτωση δεν επαρκεί να καλύψει το νερό που χάνεται από εξατμισοδιαπνοή. Ο πρωτεύων στόχος της άρδευσης είναι να εφαρμόσει νερό κατά την σωστή περίοδο και στην ορθή ποσότητα. Υπολογίζοντας το υδατικό ισοζύγιο του ριζοστρώματος σε ημερήσια βάση (Εξίσωση 4:19), υπολογίσθηκαν ο χρόνος εφαρμογής και η δόση των αρδεύσεων. Για την αποφυγή απωλειών λόγω βαθείας διήθησης που μπορεί να προκαλέσουν έκπλυση θρεπτικών στοιχείων έξω από το ριζόστρωμα, η καθαρή δόση άρδευσης ήταν μικρότερη ή ίση με την εξάντληση στο ριζόστρωμα ($I_i \leq D_{r,i}$).

Εξοικονόμηση αρδευτικού νερού με τη χρήση υπόγειας στάγδην άρδευσης

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της άρδευσης είναι να δοθεί στην καλλιέργεια συμπληρωματικό νερό, όταν αυτό που προέρχεται από τη βροχή, την ήδη αποθηκευμένη στο έδαφος υγρασία και την υγρασία που φθάνει στο ριζόστρωμα με τριχοειδή ανύψωση από βαθύτερα στρώματα, δεν είναι επαρκές για να καλύψει πλήρως τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Το νερό αυτό εξασφαλίζει την κανονική ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας. Αλλά από το νερό που φθάνει στον αγρό, δεν μπορεί όλο να αποθηκευτεί στο έδαφος στη ζώνη του ριζοστρώματος, διότι ένα μέρος του μπορεί να απορρεύσει επιφανειακά, να διηθηθεί βαθιά και να εξατμισθεί

Το ύψος αυτών των απωλειών είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη σωστή εφαρμογή της άρδευσης, η οποία προϋποθέτει τον ακριβή υπολογισμό της αρδευτικής δόσης, τον προσδιορισμό του χρόνου εφαρμογής των αρδεύσεων που καθορίζεται από την διακύμανση της εξατμισοδιαπνοής και της βροχής κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου, τον προσδιορισμό της διάρκειας της άρδευσης και την εφαρμοζόμενη μέθοδο. Για να επιτευχθεί εξοικονόμηση αρδευτικού νερού απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός των αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών και η χρήση μεθόδων εφαρμογής του νερού που να ελαχιστοποιούν τις απώλειες.

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα κλιματικά δεδομένα και η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς όπως υπολογίσθηκε βάσει αυτών, οι τιμές των φυτικών συντελεστών και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας που προέκυψε από τη χρήση αυτών και οι αρδεύσεις όπως εφαρμόστηκαν κατόπιν του προγραμματισμού άρδευσης που εκτελέσθηκε.

Βάσει των προηγούμενων, υπολογίσθηκε και παρουσιάζεται η εξοικονόμηση νερού που επιτεύχθηκε με τη χρήση της υπόγειας έναντι της επιφανειακής στάγδην άρδευσης.

5.2. ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΖΑΧΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

5.2.1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την ΕΤ_ο είναι οι κλιματικοί. Συνεπώς, η ΕΤ_ο είναι μια κλιματική παράμετρος και υπολογίζεται από τα μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό. Η ΕΤ_ο αντιπροσωπεύει την ενέργεια εξάτμισης της ατμόσφαιρας σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο και δεν λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και τις εδαφικές ιδιότητες. Η μέθοδος FAO Penman-Monteith χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διατριβή για τον υπολογισμό της ΕΤ_ο χρησιμοποιώντας τα κλιματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων των ετών 2003-05.

Από τα δεδομένα που ανακτήθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό, η σχετική υγρασία του αέρα κυμάνθηκε σε υψηλότερα επίπεδα κατά το έτος 2003 σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο έτη. Η μέση τιμή της ελάχιστης σχετικής υγρασίας κατά το μέσο στάδιο, έφθασε το 47,08 κατά το 2003 ενώ το 2004 και 2005 ήταν 26,23 και 30,47% αντιστοίχως. Η διακύμανση της μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης σχετικής υγρασίας αέρα για τα τρία έτη δίδεται στην Εικόνα 5.1.

Η θερμοκρασία (Εικόνα 5.2) κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα κατά τη διάρκεια και των τριών ετών. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε ήταν 40,4, 37,4 και 39,1 °C σε κάθε καλλιεργητική περίοδο αντιστοίχως. Κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2003 καταγράφησαν 15 ημέρες με μέγιστες τιμές μεγαλύτερες από 35 °C, το 2004 καταγράφησαν 15 ημέρες και 10 ημέρες το 2005.

Η ηλιακή ακτινοβολία όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα του μετεωρολογικού σταθμού και παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3, δεν διέφερε ως προς την μέση τιμή της κατά τη διάρκεια των τριών καλλιεργητικών περιόδων και κυμάνθηκε στα 20,6, 20,2 και 19,2 MJ day⁻¹ m², για κάθε έτος αντιστοίχως.

Οι καταγεγραμμένες μέσες ημερήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου δίδονται στην Εικόνα 5.4. Το έτος 2003 καταγράφηκε μέγιστη ημερήσια τιμή 2,93, το 2004 καταγράφηκε τιμή 3,20 και το 2005 καταγράφηκε τιμή 3,49 m s⁻¹. Οι μέσες τιμές κατά τη διάρκεια του μέσου σταδίου των τριών καλλιεργητικών περιόδων ήταν 1,37, 1,27 και 1,20 m s⁻¹ αντιστοίχως.

Οι βροχοπτώσεις των τριών ετών πειραματισμού δίδονται στην Εικόνα 5.5. Κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2003 καταγράφησαν 23 ημέρες βροχόπτωσης, το

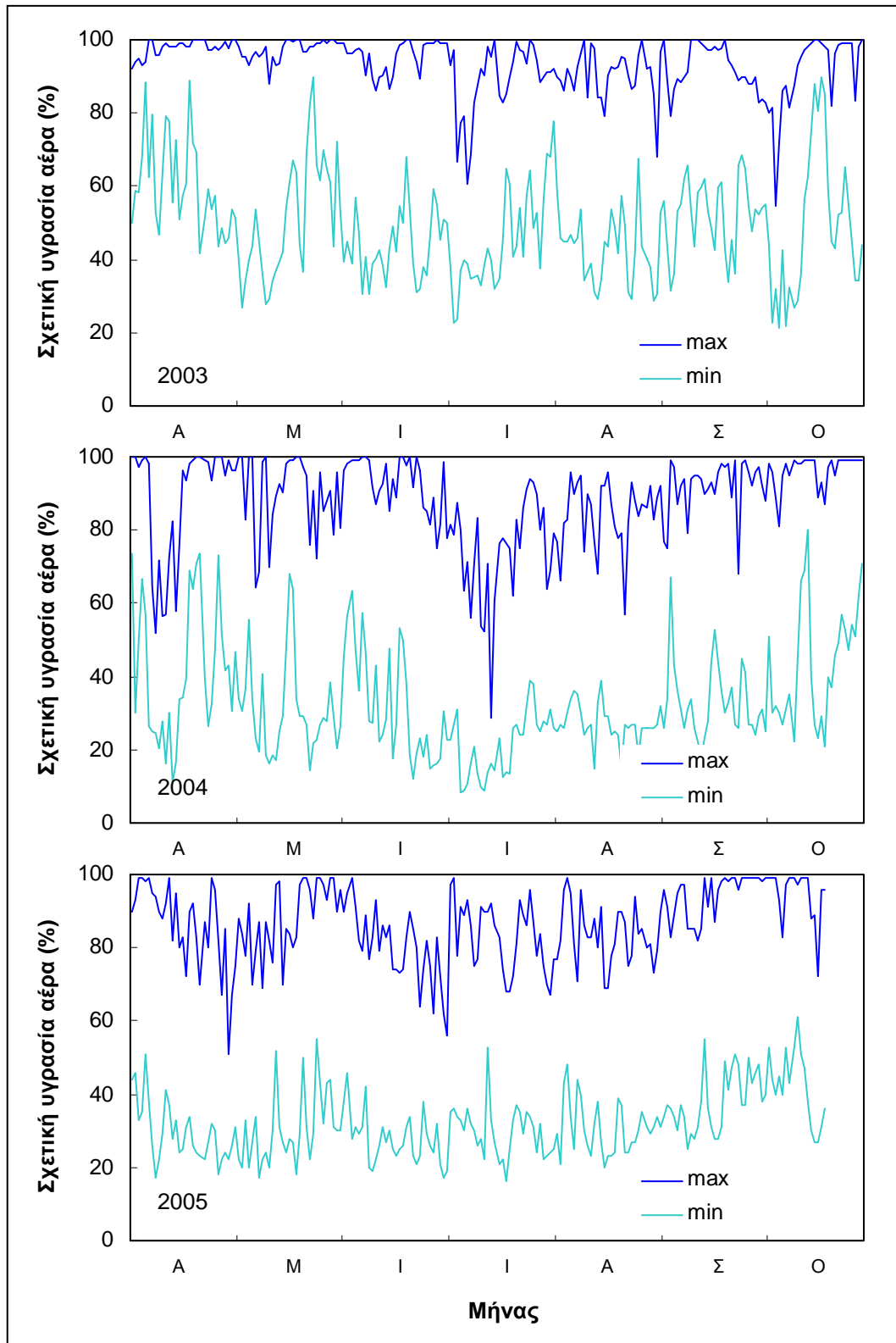
2004 οι ημέρες βροχόπτωσης ήταν 24 και το 2005 ήταν 17. Το συνολικό ύψος βροχής ήταν αντίστοιχα, 101,3, 125,3 και 128,7 mm.

Ενώ ως συνολικό ύψος η βροχόπτωση δεν διέφερε ιδιαίτερος κατά τα τρία έτη, εντούτοις διαφοροποιήθηκε σημαντικά σε σχέση με τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας. Έτσι, κατά το πρώτο στάδιο ανάπτυξης, η βροχόπτωση έφθασε τα 23,3 mm το 2003, ήταν υπερδιπλάσια το 2004 φθάνοντας τα 62,1 mm και ήταν αμελητέα το 2005 αφού άγγιξε μόλις τα 2,3 mm. Έντονη διαφοροποίηση παρατηρείται και στο ύψος βροχής κατά το μέσο στάδιο, όπου έφθασε τα 45,5 και τα 42,5 mm το 2003 και το 2005 αντιστοίχως, ενώ ήταν το μισό περίπου το 2004 φθάνοντας τα 19,6 mm.

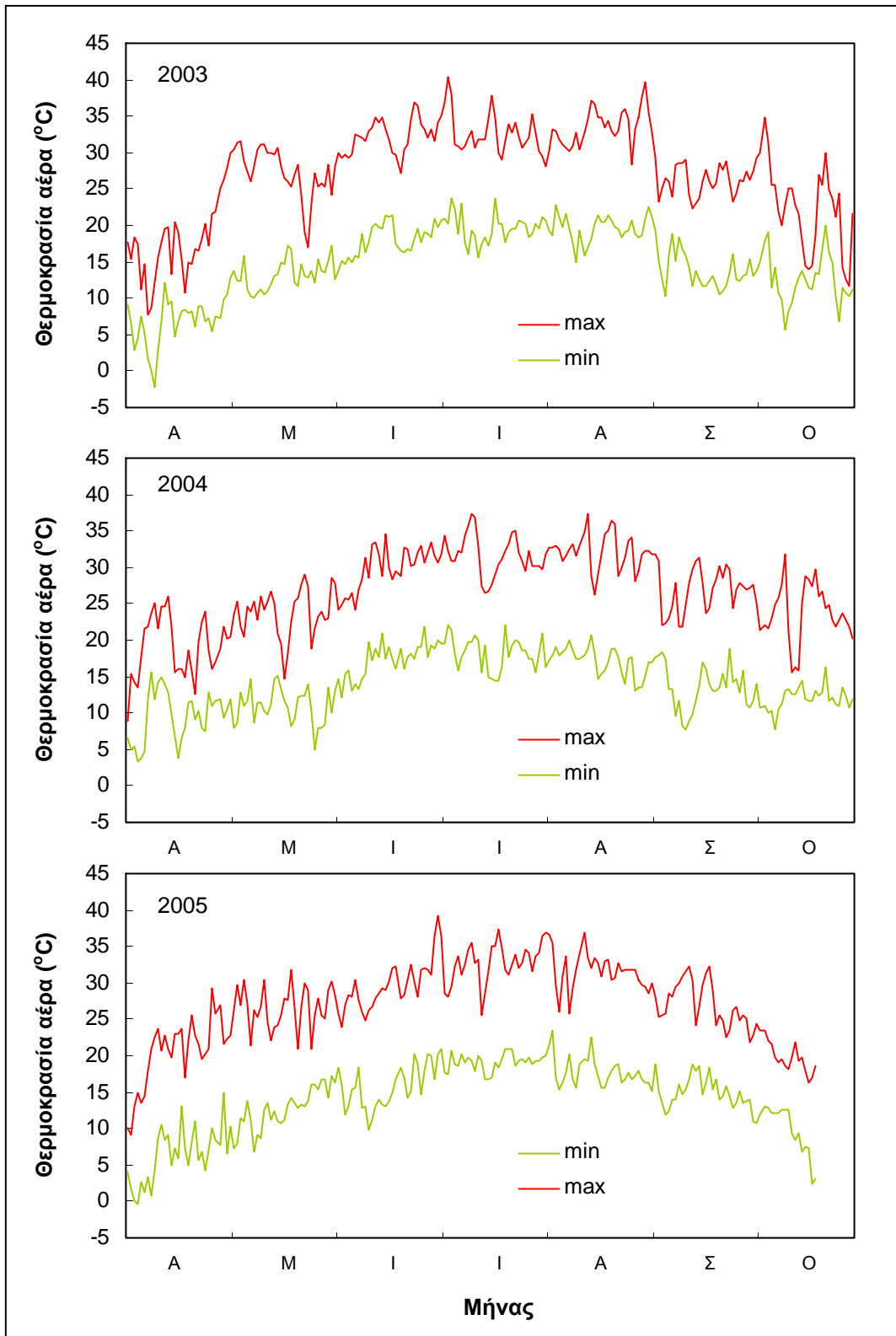
Έντονη διαφοροποίηση παρουσιάζει το ύψος της βροχής σε σχέση με την περίοδο εφαρμογής των αρδεύσεων μεταχείρισης και κυρίως πριν από αυτήν. Έτσι, μέχρι την έναρξη των αρδεύσεων με σταγόνα, το ύψος των βροχοπτώσεων έφθασε τα 34,4 mm το 2003, τα 67,9 mm το 2004 και τα 42,9 mm το 2005. Ως αποτέλεσμα των βροχών κατά την περίοδο αυτή, κατά το 2004 δεν πραγματοποιήθηκε άρδευση φυτρώματος.

Από την έναρξη της στάγδην άρδευσης μέχρι και την λήξη των αρδεύσεων, η συνεισφορά της βροχόπτωσης ήταν σχετικά μικρή και έφθασε τα 48,7 mm το 2003, τα 42,8 mm το 2004 και τα 33,4 mm το έτος 2005. Το γεγονός των μειωμένων βροχοπτώσεων συντελεί στην πιο ξεκάθαρη αξιολόγηση των μεθόδων άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν σε σχέση με τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας των ζαχαροτεύλων, μιας και οι αναγκαίες για την καλλιέργεια ποσότητες νερού χορηγήθηκαν κυρίως μέσω της άρδευσης.

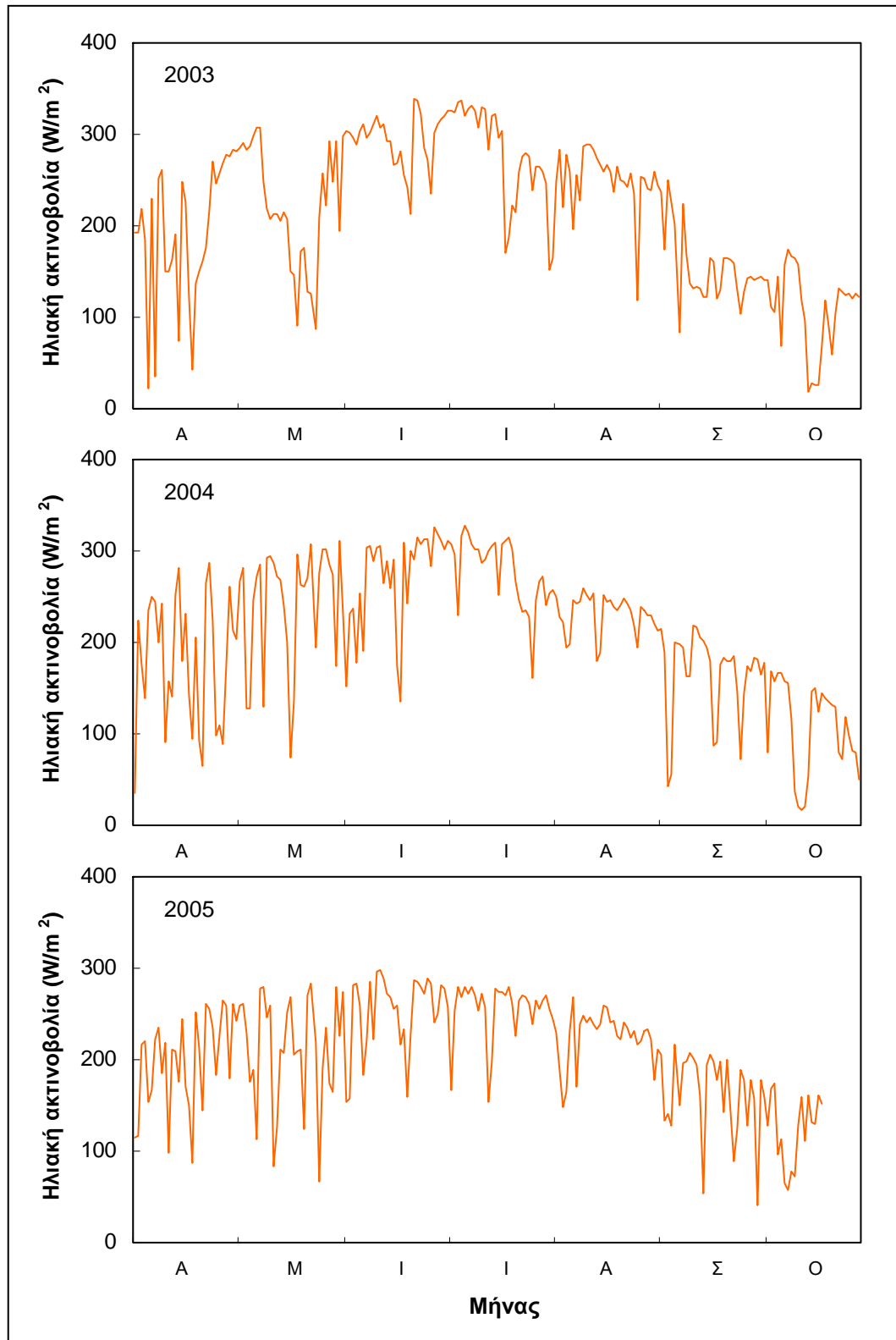
Η Εικόνα 5.6 παρουσιάζει τις ημερήσιες τιμές της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, όπως υπολογίσθηκαν με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO. Η συνολική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ανήλθε στα 750,4, 731,2 και 750,3 mm, για κάθε έτος αντιστοίχως.



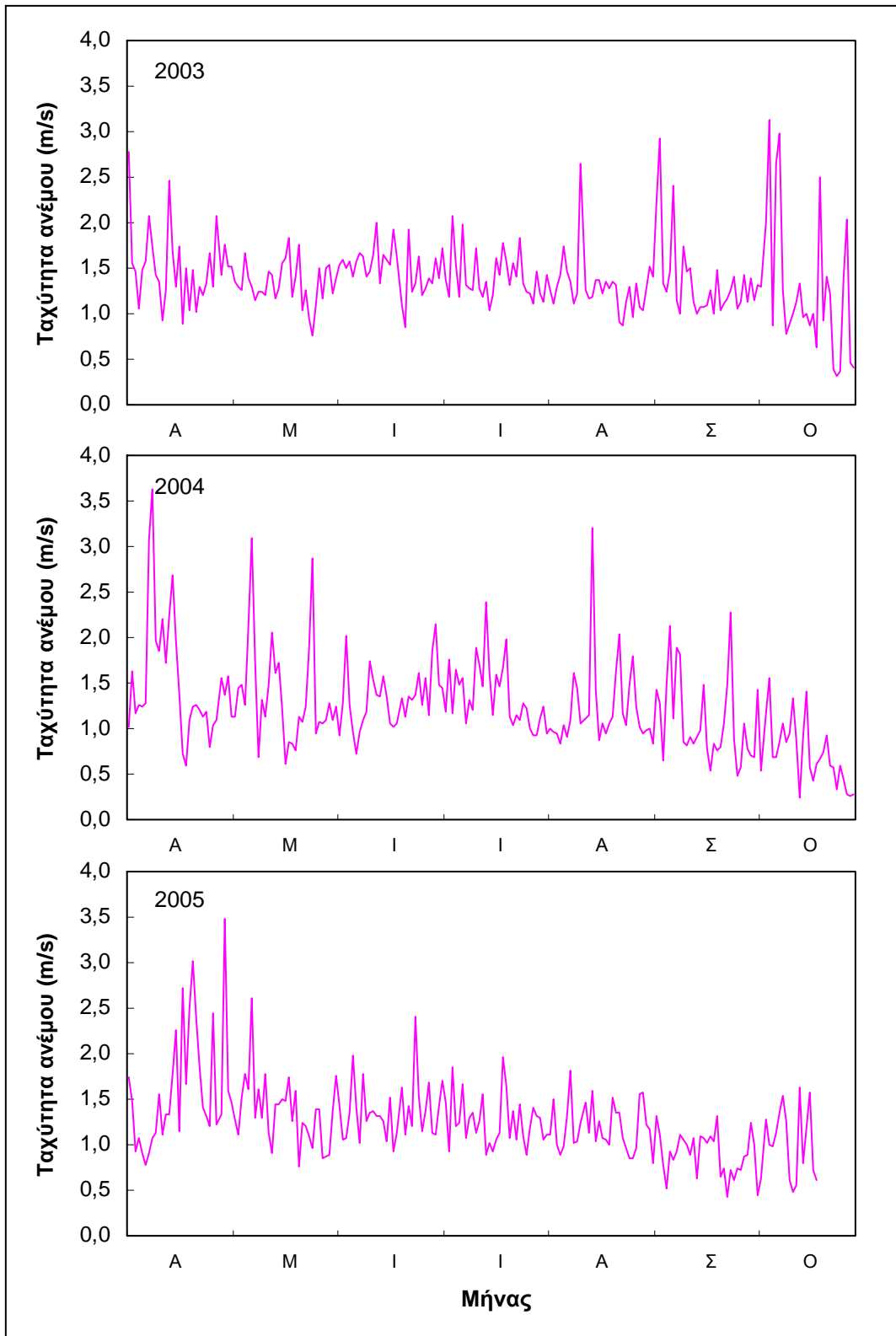
Εικόνα 5.1: Τιμές σχετικής υγρασίας αέρα κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.



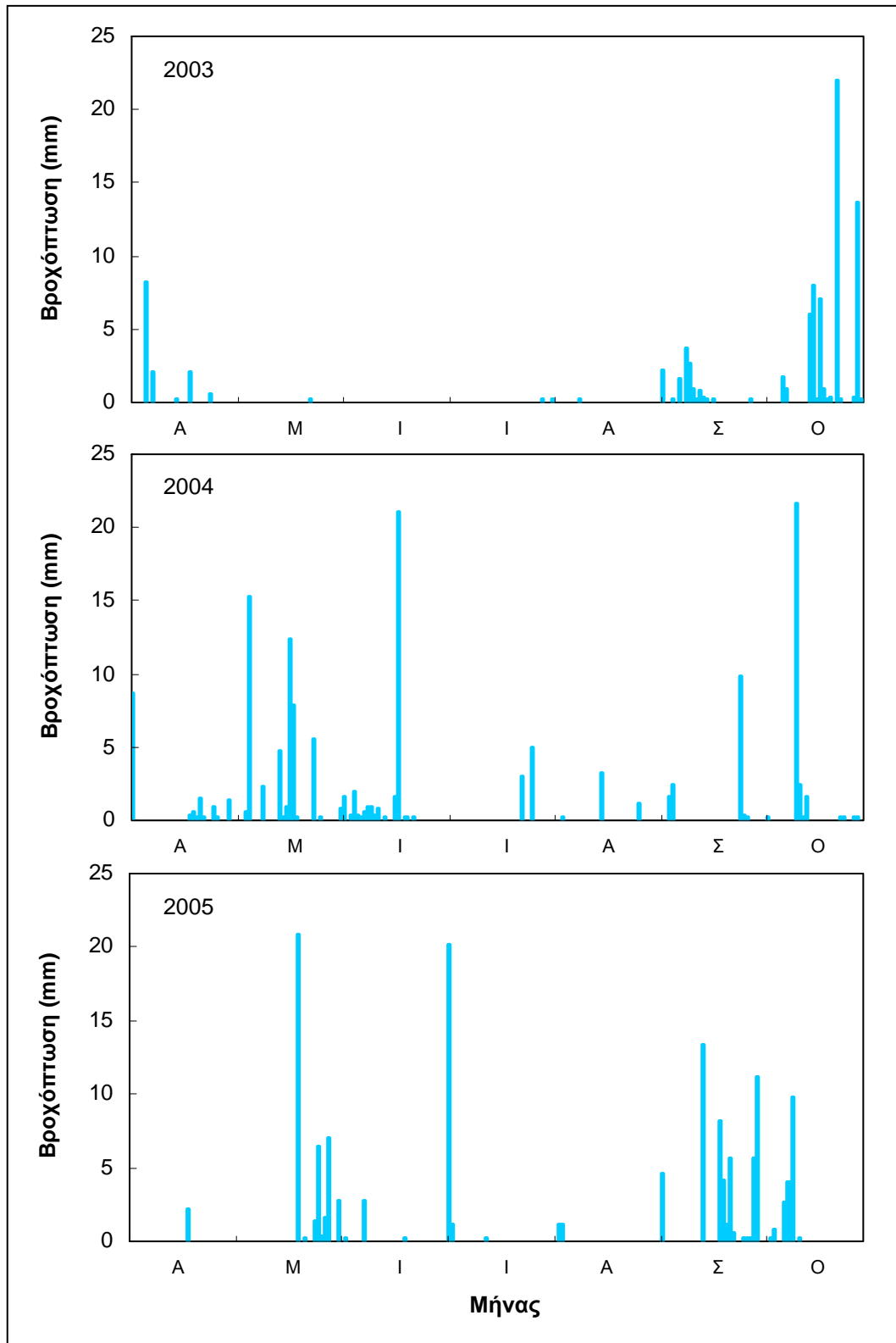
Εικόνα 5.2: Τιμές θερμοκρασίας αέρα κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.



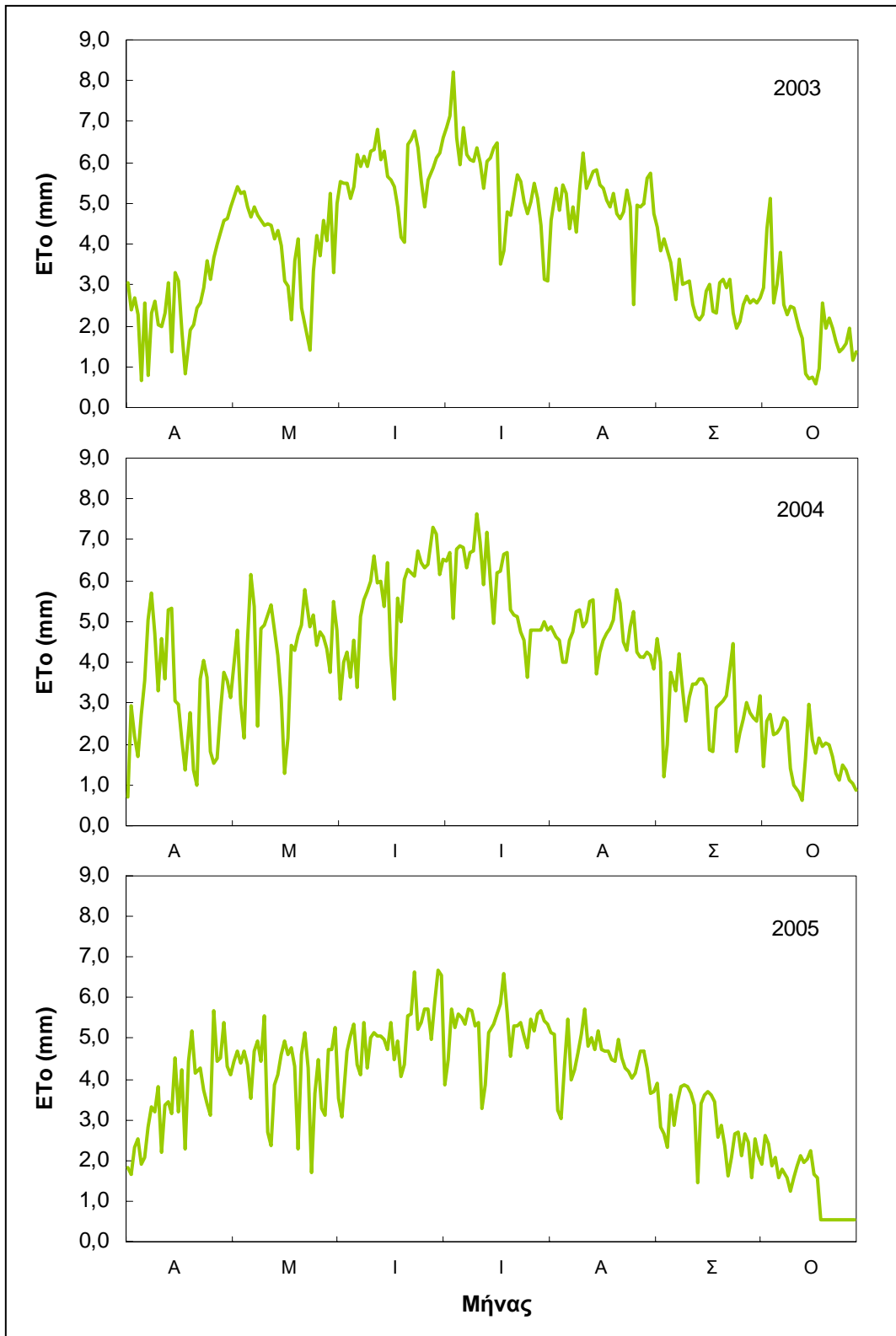
Εικόνα 5.3: Τιμές ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.



Εικόνα 5.4: Τιμές ταχύτητας ανέμου κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.



Εικόνα 5.5: Τιμές βροχόπτωσης κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.



Εικόνα 5.6: Τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.

5.2.2. ΦΥΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, ο φυτικός συντελεστής χρησιμοποιείται μαζί με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ETo , για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των διαφόρων καλλιεργειών. Οι ανάγκες αυτές εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, Etc .

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή των φυτικών συντελεστών είναι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, η εποχή σποράς ή φύτευσης, ο ρυθμός ανάπτυξης της καλλιέργειας, η διάρκεια της βλαστικής περιόδου, οι εδαφικές και κλιματικές συνθήκες. Η ημερομηνία σποράς ή φύτευσης επηρεάζει το μήκος της βλαστικής περιόδου, το ρυθμό ανάπτυξης μέχρι την πλήρη κάλυψη του εδάφους από την καλλιέργεια και το χρόνο προς την ωριμότητα.

Όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4, η Etc είναι το άθροισμα της διαπνοής από τα φυτά και της εξάτμισης από το έδαφος. Κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης, η εξάτμιση από το έδαφος είναι σημαντική και εξαρτάται από την υγρασία της επιφάνειας του εδάφους, η οποία επηρεάζεται από τη συχνότητα των βροχών ή των αρδεύσεων κατά την περίοδο αυτή, επηρεάζοντας ανάλογα την τιμή του φυτικού συντελεστή. Η εξάτμιση, πλην των άλλων, επηρεάζεται και από τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής στρώσης του εδάφους. Οι κλιματικές συνθήκες και, ιδιαίτερα, η υγρασία της ατμόσφαιρας και η ταχύτητα του ανέμου, επηρεάζουν επίσης την τιμή του Kc . Σε σύγκριση με την ομαλή επιφάνεια ενός χλοοτάπητα, ο άνεμος επηρεάζει το ρυθμό της διαπνοής των υψηλότερων καλλιεργειών η οποία οφείλεται στην αναταραχή που προκαλείται πάνω από αυτήν, την πιο ανώμαλη, φυτική επιφάνεια. Η επίδραση είναι μεγαλύτερη κάτω από ξερές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Οι παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής περιλαμβάνουν τις ημερομηνίες σποράς, το μήκος των σταδίων ανάπτυξης, τους βασικούς φυτικούς συντελεστές, το ύψος των φυτών και το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος της καλλιέργειας.

Η ανάπτυξη ζιζανίων ήταν μικρή και οποιαδήποτε βλάστηση καταπολεμούνταν με σκάλισμα. Έτσι, κατά τους υπολογισμούς, η κάλυψη του εδάφους οφειλόταν μόνο σε αυτήν της καλλιέργειας.

Η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης των καλλιεργειών προσδιορίστηκε με βάση την βιβλιογραφία (Allen et al., 1998) και τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια εξέλιξής τους.

Για την έναρξη του δευτέρου σταδίου το κριτήριο ήταν το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από το φύλλωμα της καλλιέργειας. Όταν η κάλυψη του εδάφους ανέρχεται σε ποσοστό 10%, θεωρείται ότι η καλλιέργεια εισέρχεται στο στάδιο της ταχείας ανάπτυξης. Για τον προσδιορισμό της έναρξης του 3^{ου} σταδίου (πλήρους ανάπτυξης της καλλιέργειας) χρησιμοποιήθηκε εκτός των παρατηρήσεων και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI). Οι ημέρες του έτους κατά τις οποίες συμβαίνουν οι αλλαγές των σταδίων φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1. Ημέρα του έτους κατά την οποία έγινε η σπορά και παρατηρήθηκε η αλλαγή των σταδίων της καλλιέργειας των ζαχαροτεύλων

Έτος	J_{plant}	J_{dev}	J_{mid}	J_{late}	J_{harv}
2003	111	146	191	261	279
2004	110	145	190	260	275
2005	102	137	182	252	273

J_{plant} : ημέρα σποράς, J_{dev} : ημέρα έναρξης 2^{ου} σταδίου, J_{mid} : ημέρα έναρξης 3^{ου} σταδίου, J_{late} : ημέρα έναρξης 4^{ου} σταδίου, J_{harv} : ημέρα ολοκλήρωσης της ωρίμανσης.

Φυτικοί συντελεστές

Οι τιμές του βασικού φυτικού συντελεστή για τα ζαχαρότευτλα και για κάθε στάδιο ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς ελήφθησαν από το FAO-56 (Allen et al., 1998) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται επίσης και το μέγιστο ύψος των καλλιεργειών (H_{max}) που επίσης λήφθηκε από την ίδια πηγή. Από τους υπολογισμούς του προγράμματος προέκυψαν και οι μέγιστες τιμές των φυτικών συντελεστών οι οποίες δίνονται στον ίδιο Πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. Φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

Έτος	$K_{cb_{ini}}$	$K_{cb_{mid}}$	$K_{cb_{end}}$	H_{max}
	0,15	1,15 ⁽¹⁾	0,50 ⁽²⁾	
2003	0,15	1,13	0,48	0,5
2004	0,15	1,18	0,53	0,5
2005	0,15	1,17	0,42	0,5

$K_{cb_{ini}}$: ο βασικός φυτικός συντελεστής κατά το αρχικό στάδιο, $K_{cb_{mid}}$: ο βασικός φυτικός συντελεστής κατά το μέσο στάδιο, $K_{cb_{end}}$: ο βασικός φυτικός συντελεστής κατά το τελικό στάδιο, H_{max} : το μέγιστο ύψος της καλλιέργειας.

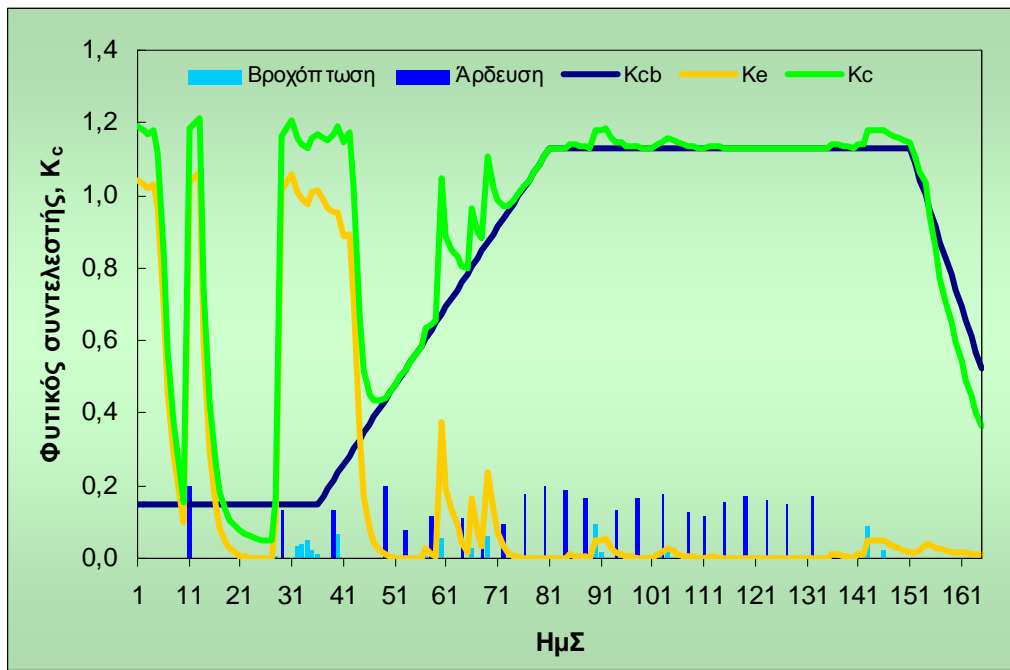
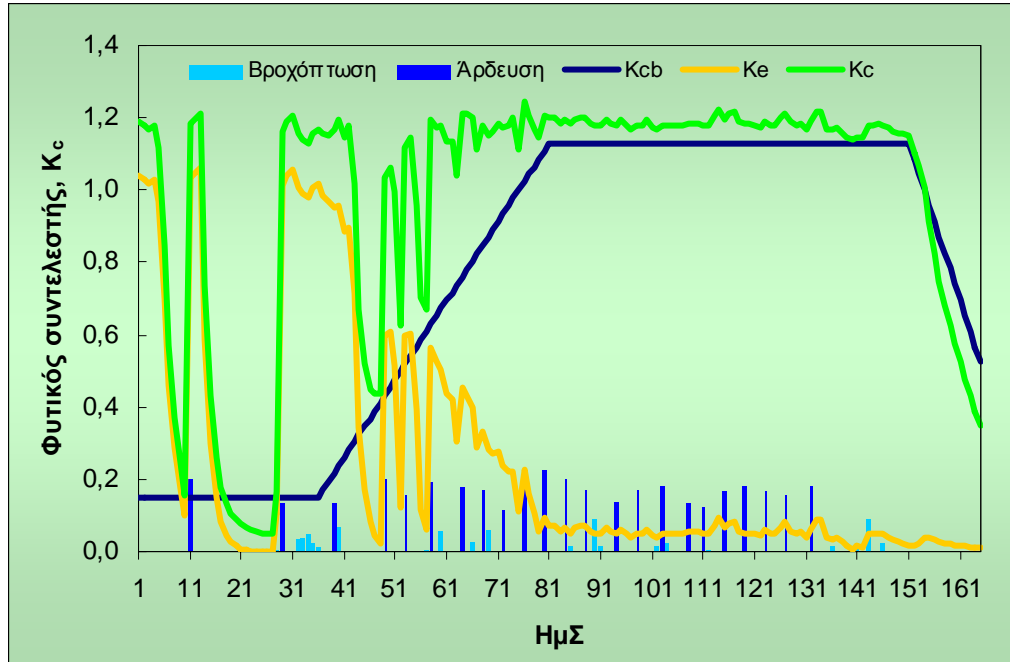
⁽¹⁾ Ο φυτικός συντελεστής στο στάδιο 3 είναι ο αρχικά θεωρούμενος που τροποποιείται ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες σύμφωνα με την Εξ. 4:24.

⁽²⁾ Ο φυτικός συντελεστής στο τέλος του σταδίου 4 είναι ο αρχικά θεωρούμενος που τροποποιείται ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες σύμφωνα με την Εξ. 4:24.

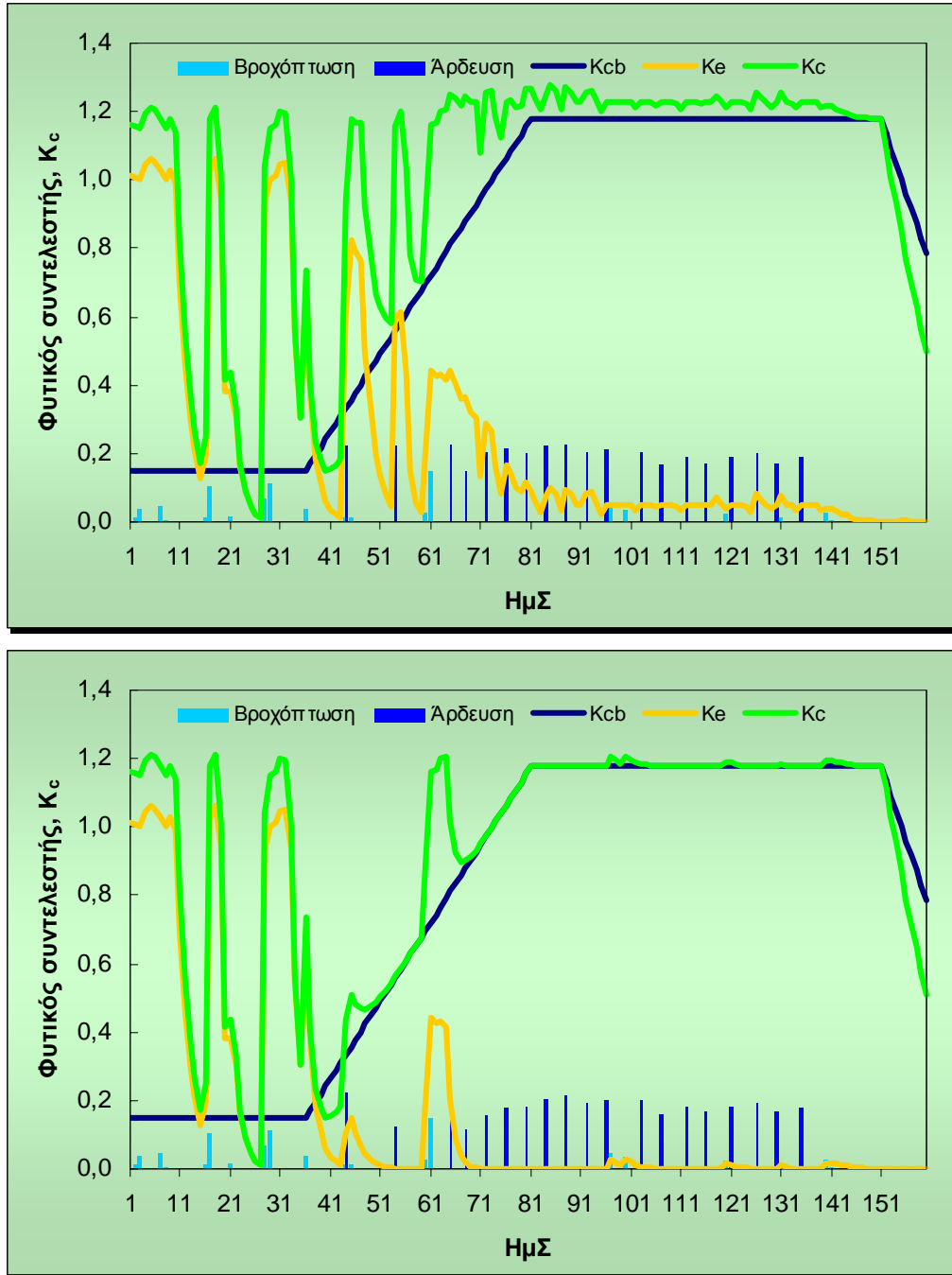
Οι Εικόνες 5.7α, β και γ δείχνουν την διακύμανση του φυτικού συντελεστή, του συντελεστή εξάτμισης και του βασικού συντελεστή για κάθε καλλιεργητικό έτος για την επιφανειακή και την υπόγεια εφαρμογή αντίστοιχα. Οι αιχμές των γραμμών του φυτικού συντελεστή και του συντελεστή εξάτμισης είναι αποτέλεσμα των γεγονότων ύγρυνσης του εδάφους είτε από βροχόπτωση είτε από άρδευση.

Κατά τον Απρίλιο και το μεγαλύτερο μέρος του Μαΐου, η διαπνοή από τα μικρά φυτά ήταν πολύ μικρή σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μικρής φυλλικής επιφάνειας. Από τη στιγμή που η φυτοκάλυψη είναι πλήρης (περίπου 60 ημέρες μετά τη σπορά) ο K_{cb} υπερβαίνει το 1 λόγω της υψηλής διαπνοής που σχετίζεται με την μεγάλη επιφάνεια που σχηματίζει πλέον το φύλλωμα.

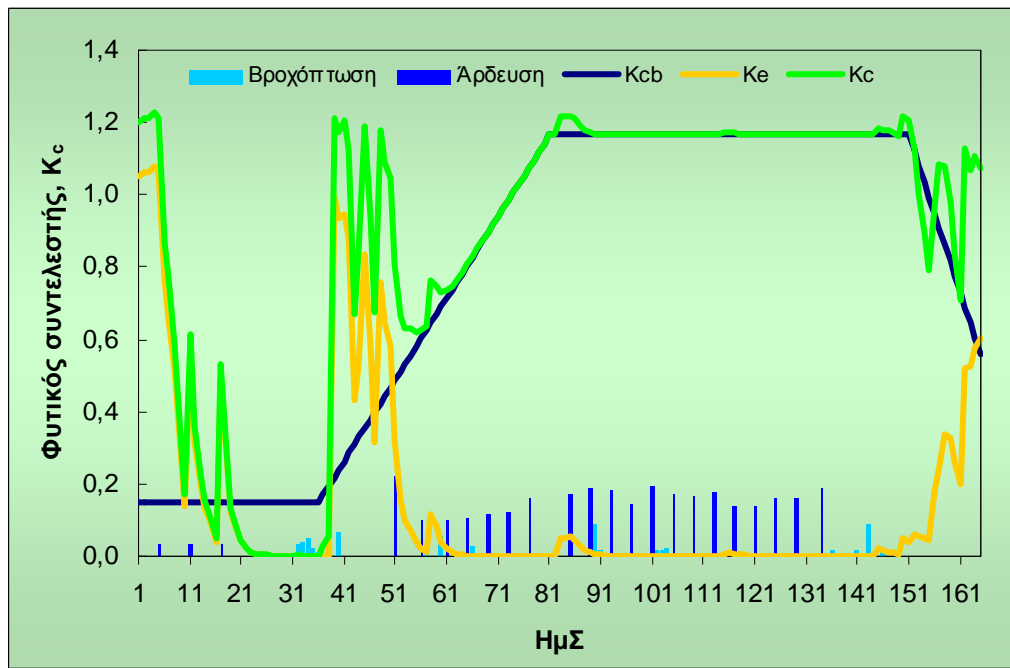
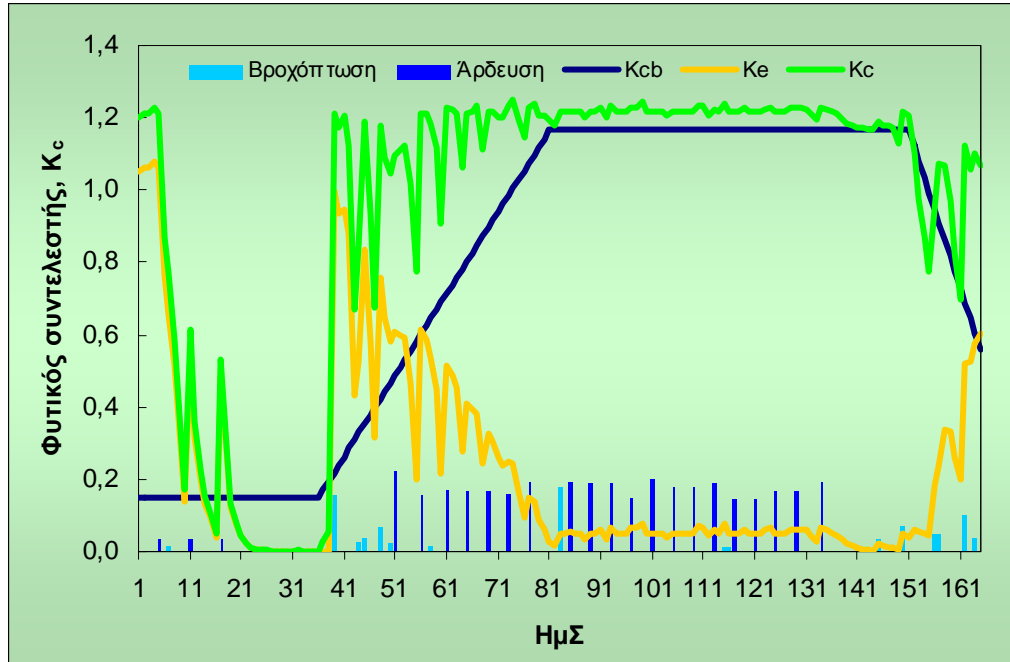
Ο (διπτός) φυτικός συντελεστής κυμάνθηκε σε διαφορετικά επίπεδα σε κάθε αρδευτική μέθοδο. Έτσι, κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της βλαστικής περιόδου, από το μέσο του δεύτερου σταδίου έως και το μέσο περίπου του τελικού, η καμπύλη του διπτού συντελεστή κυμαίνεται υψηλότερα από αυτήν του βασικού φυτικού συντελεστή στην επιφανειακή άρδευσης ενώ πλησιάζει πολύ στην περίπτωση της υπόγεια άρδευσης, διαφέροντας μόνον στις περιπτώσεις που σημειώθηκε βροχόπτωση.



Εικόνα 5.7α: Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2003 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός συντελεστής).



Εικόνα 5.7β: Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2004 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός συντελεστής).



Εικόνα 5.7γ: Οι φυτικοί συντελεστές της καλλιέργειας κατά το έτος 2005 για την επιφανειακή (επάνω) και την υπόγεια (κάτω) στάγδην άρδευση. (K_{cb} = Βασικός φυτικός συντελεστής, K_e = Συντελεστής εξάτμισης, K_c = Φυτικός συντελεστής).

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

Στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για την επιφανειακά και τα υπόγεια τεμάχια για κάθε καλλιεργητική περίοδο. Η αθροιστική $ET_{c \text{ act}}$ κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου δεν διέφερε σημαντικά από έτος σε έτος σε κάθε αρδευτική μέθοδο. Διαφοροποιήθηκε όμως μεταξύ των μεθόδων, παρουσιάζοντας μειωμένη κατά 9% περίπου στα αρδευόμενα με ΥΣΑ τεμάχια.

Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση εμφανίσθηκε κατά το στάδιο ταχείας ανάπτυξης (2^ο) όπου η $ET_{c \text{ act}}$ στην ΥΣΑ έφθασε το 78% περίπου της εξατμισοδιαπνοής στην ΕΣΑ. Μικρότερη, αλλά σημαντική, ήταν η διαφοροποίηση κατά το μέσο στάδιο (3^ο) όπου η $ET_{c \text{ act}}$ στην ΥΣΑ έφθασε το 94% αυτής στην ΕΣΑ. Στο αρχικό και το τελικό στάδιο η πραγματική εξατμισοδιαπνοή των ζαχαροτεύτλων έφθασε στα ίδια επίπεδα και στις δύο μεθόδους άρδευσης.

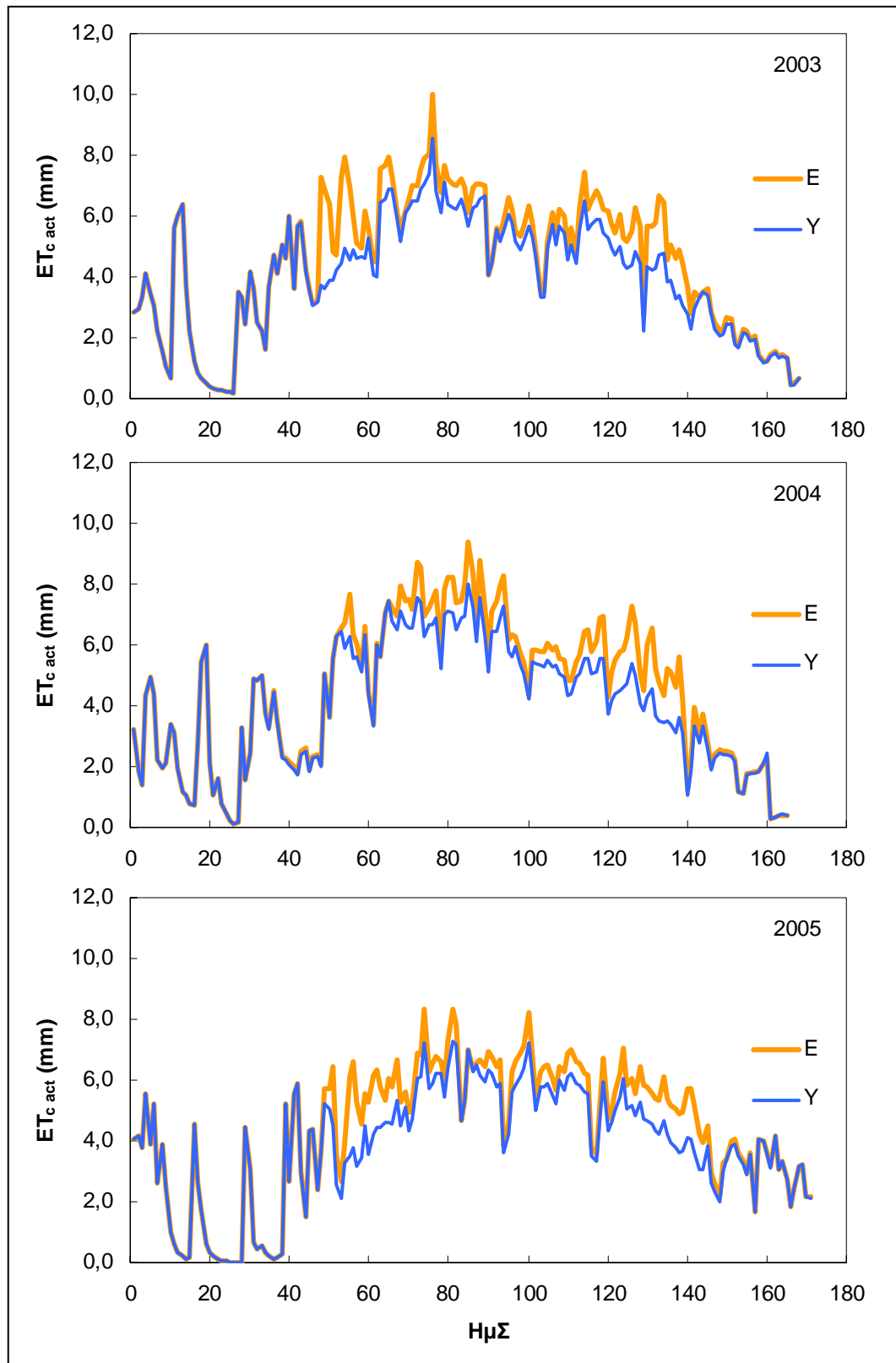
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3. Τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής όπως υπολογίσθηκαν για κάθε έτος και βλαστικό στάδιο στην επιφανειακή και στην υπόγεια στάγδην άρδευση αντιστοίχως

Έτος	Βλαστικό στάδιο	$ET_{c \text{ act}}$ (mm)		
		ΕΣΑ	ΥΣΑ	ΥΣΑ/ΕΣΑ
2003	1 ^ο	61,5	61,5	1,0
	2 ^ο	170,0	130,5	0,781
	3 ^ο	486,8	456,6	0,937
	4 ^ο	29,6	30,2	≈ 1,0
	Σύνολο	744,9	678,8	0,911
2004	1 ^ο	66,5	66,5	1,0
	2 ^ο	127,5	101,0	0,792
	3 ^ο	518,8	483,6	0,932
	4 ^ο	34,7	35,3	≈ 1,0
	Σύνολο	747,5	686,4	0,918
2005	1 ^ο	43,3	43,3	1,0
	2 ^ο	155,3	119,5	0,769
	3 ^ο	489,3	466,5	0,953
	4 ^ο	43,4	43,7	≈ 1,0
	Σύνολο	731,3	673,0	0,920

Κατά την διάρκεια των αρδεύσεων μεταχείρισης, η $ET_{c\ act}$ των ζαχαροτεύτλων στα πειραματικά τεμάχια που αρδεύονταν με επιφανειακή στάγδην έφθασε τα 537, mm κατά την περίοδο του 2003, τα 557,0 mm κατά το 2004 και τα 516,9 mm κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2005.

Τα συνολικά ύψη της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας στα τεμάχια που αρδεύονταν υπογείως ήταν 470,5 mm, 496,4 mm και 458,6 mm, για τις καλλιεργητικές περιόδους των ετών 2003, 2004 και 2005, αντιστοίχως. Συνεπώς, κατά την διάρκεια των αρδεύσεων μεταχείρισης η $ET_{c\ act}$ στην ΥΣΑ έφθασε το 88% περίπου της $ET_{c\ act}$ στην ΕΣΑ.

Η διαφοροποίηση αυτή φαίνεται στην Εικόνα 5.8 η οποία παρουσιάζει την διακύμανση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας όπως υπολογίσθηκε για την επιφανειακή και την υπόγεια εφαρμογή του νερού για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους. Η εξατμισοδιαπνοή της υπόγεια στάγδην εμφανίζεται μειωμένη μετά την 50^η περίπου ημέρα μετά την σπορά ως και την 145^η, χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην περίοδο των αρδεύσεων μεταχείρισης.



Εικόνα 5.8: Η διακύμανση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας όπως υπολογίστηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση.

5.3. ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

5.3.1. ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ

Το FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 (Allen et al., 1998) καθορίζει μια διαδικασία για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής και τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Αυτή η διαδικασία, με κάποιες μετατροπές, χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διατριβή για τον υπολογισμό του ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο χρησιμοποιώντας την E_0 και φυτικούς συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ύγρανσης της εδαφικής επιφάνειας. Υπολογίστηκε έτσι το υδατικό ισοζύγιο σε ημερήσια βάση για τρεις καλλιεργητικές περιόδους στον πειραματικό αγρό. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στο Excel υπολογίζει δύο υδατικά ισοζύγια. Ένα ισοζύγιο για το ριζόστρωμα και ένα για την ζώνη εξάτμισης του εδάφους (επιφανειακό στρώμα).

Το υδατικό ισοζύγιο στο ριζόστρωμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας και τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Με βάση το σταθερό προαποφασισμένο εύρος αρδεύσεων υπολογιζόταν κάθε φορά η απαιτούμενη δόση άρδευσης.

Το υδατικό ισοζύγιο στην στρώση εξάτμισης, προσδιορίζει την εξάτμιση από το έδαφος για όλο το σύστημα. Όταν η εξάντληση είναι μικρή (η ποσότητα νερού στην στρώση εξάτμισης είναι μεγάλη) ο ρυθμός εξάτμισης είναι υψηλός και μειώνεται με την αύξηση της εξάντλησης. Μέχρι να ξηραθεί η εδαφική επιφάνεια, η εξάτμιση συνεχίζεται σε έναν μέγιστο ρυθμό. Η εξάτμιση από το έδαφος μειώνεται ανάλογα με την ποσότητα νερού που έχει παραμείνει στην στρώση εξάτμισης.

Οι παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων περιλαμβάνουν τις υδραυλικές παραμέτρους του εδάφους και το επιτρεπόμενο έλλειμμα διαχείρισης.

Ο καταιονισμός χρησιμοποιήθηκε για άρδευση για το φύτεμα της καλλιέργειας. Στην περίπτωση αυτή όπως και για τις βροχοπτώσεις, το ποσοστό διαβροχής της επιφάνειας του εδάφους λαμβανόταν ίσο με 100% ($f_w = 1$). Στις αρδεύσεις με σταγόνα, το ποσοστό της διαβρεχόμενης εδαφικής επιφάνειας λαμβανόταν ίσο με 50% ($f_w = 0,5$).

Η αρχική εξάντληση θεωρήθηκε ίση με μηδέν αφού είτε είχε σημειωθεί βροχόπτωση, είτε προηγήθηκε άρδευση του πειραματικού αγρού πριν την σπορά.

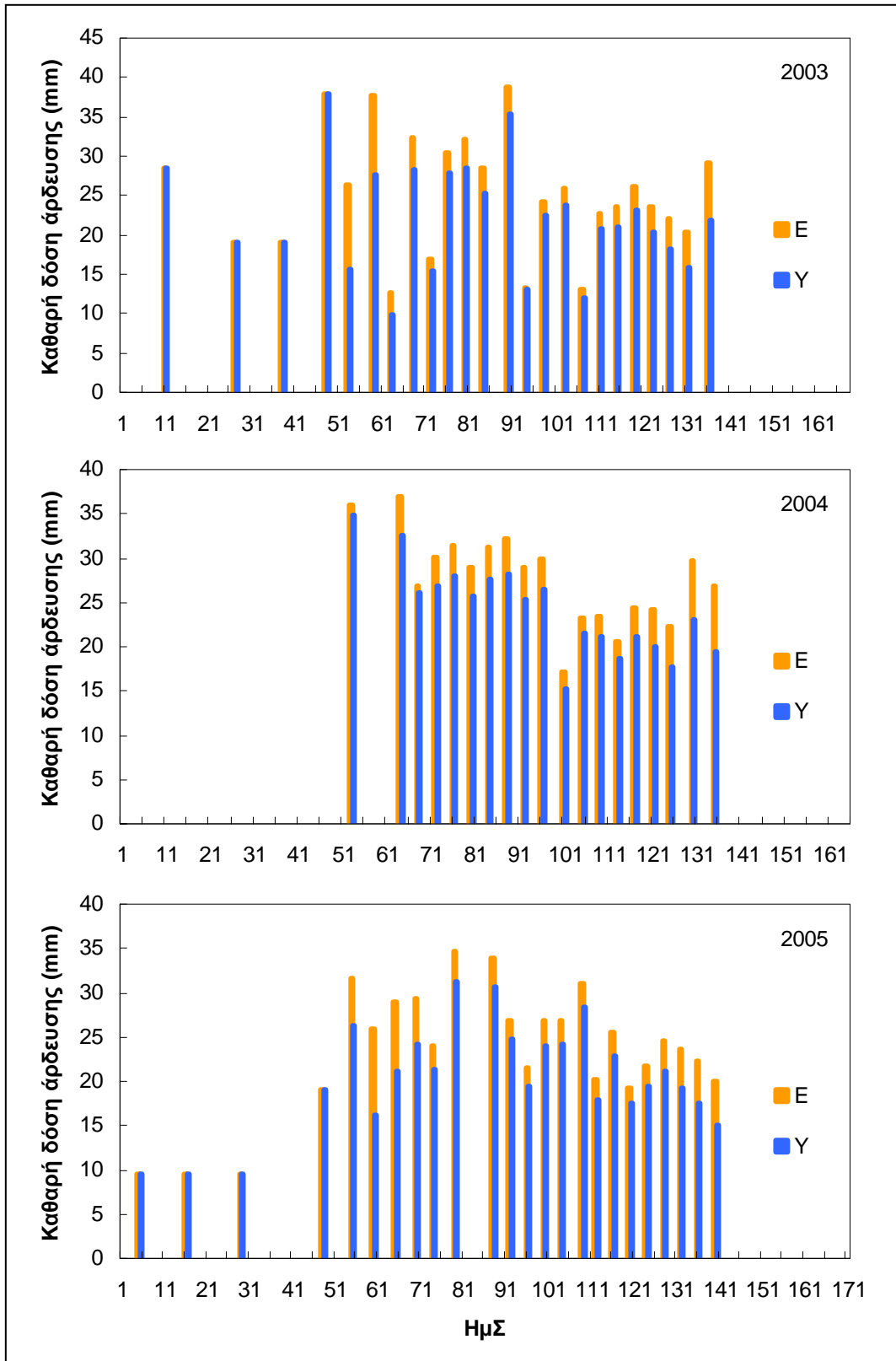
Η κατανομή των αρδεύσεων στο επιφανειακό και στο υπόγειο σύστημα στην διάρκεια της βλαστικής περιόδου κάθε έτους καθώς και το ύψος αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.9. Το εύρος άρδευσης που ακολουθήθηκε και στα τρία έτη της πειραματικής διαδικασίας ήταν 4 ημέρες ενώ η δόση υπολογίζονταν μέσω του υδατικού ισοζυγίου όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς την εξάτμιση από το επιφανειακό έδαφος και θεωρώντας πως στις υπόγειες μεταχειρίσεις το στρώμα των 10 cm δεν διαβρεχόταν από την άρδευση παρά μόνον από την βροχόπτωση, η δόση άρδευσης παρουσίασε την διαφοροποίηση που φαίνεται στην Εικόνα 5.9 μεταξύ επιφανειακού και υπόγειου συστήματος.

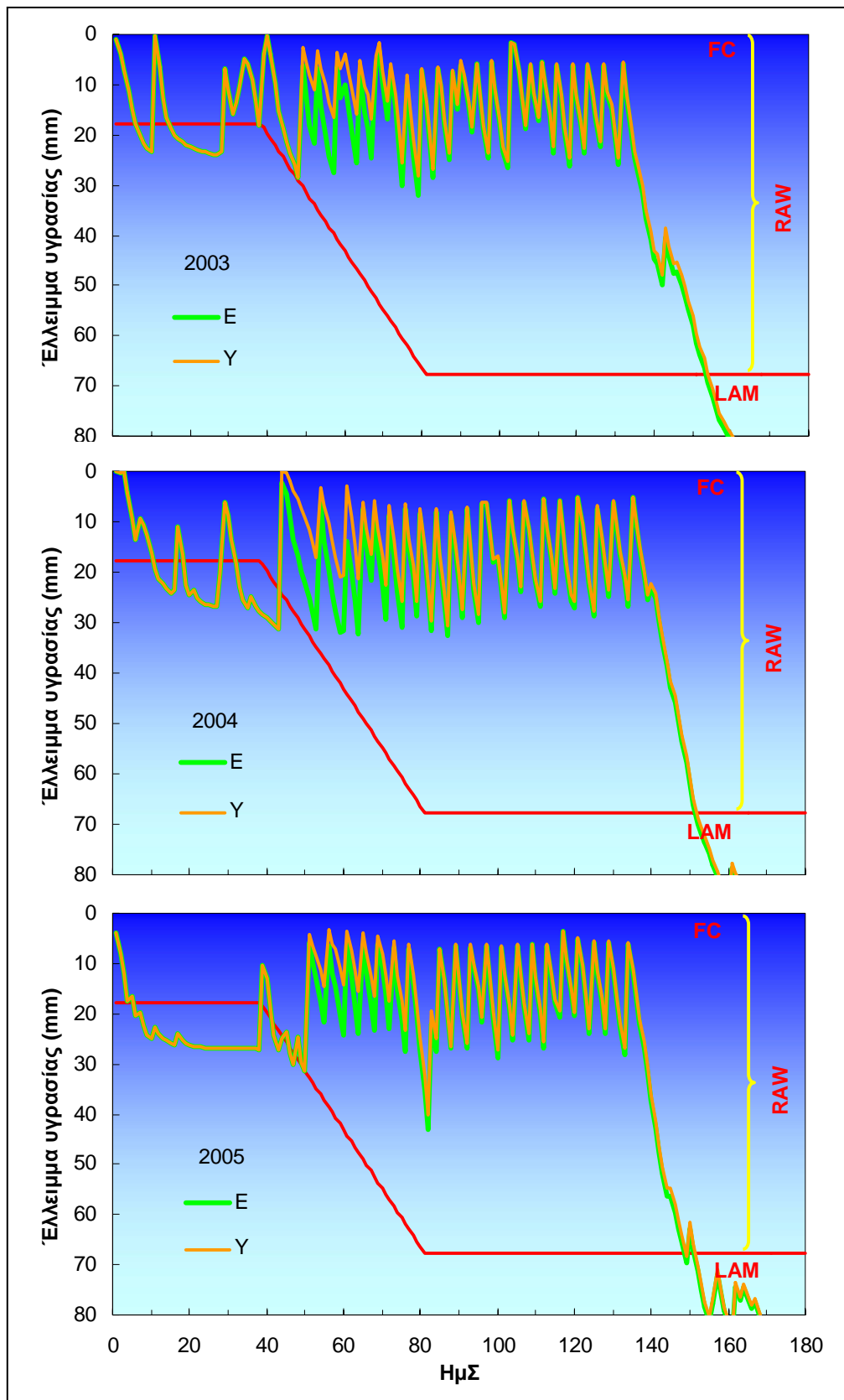
Η διαφοροποίηση αυτή είναι φανερή και στην Εικόνα 5.10 που παρουσιάζει την εξάντληση της εδαφικής υγρασίας όπως υπολογίσθηκε με βάση τις πραγματοποιούμενες αρδεύσεις. Η εξάντληση δείχνει πως η καλλιέργεια καταπονήθηκε κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αυτού του τύπου η διαχείριση είναι συνήθης στην καλλιέργεια ζαχαροτεύλων.

Κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2003 διεξήχθησαν 21 αρδεύσεις με σταγόνα, 19 αρδεύσεις το 2004 και 21 το 2005 σε όλες τις μεταχειρίσεις. Τα συνολικά ύψη νερού που χορηγήθηκαν μέσω της άρδευσης ανήλθαν στα 585 mm, 568 mm και 543 mm για κάθε έτος στην επιφανειακή στάγδην άρδευση ενώ στην υπόγεια έφθασαν τα 517mm, 505 mm και 482 mm για κάθε έτος αντιστοίχως.

Σημειώνεται πως αναφέρεται μια τιμή ύψους νερού κάθε έτος και για κάθε μέθοδο, αφού εφαρμόστηκε η αυτή ποσότητα νερού σε κάθε μεταχείριση που αρδευόταν με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Οι τελικές ποσότητες δεν διέφεραν πάνω από 1 mm ($1\text{m}^3 \text{στρ}^{-1}$) αφού οποιεσδήποτε διαφοροποιήσεις κατά την διάρκεια μιας άρδευσης (π.χ. λόγω διακοπής της παροχής για κάποια εργασία) καταγράφονταν μέσω των υδρομέτρων και διορθώνονταν άμεσα.



Εικόνα 5.9: Η κατανομή και το ύψος των αρδύσεων για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (Ε) και την υπόγεια (Υ) στάγδην άρδευση (ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά).



Εικόνα 5.10: Το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας όπως υπολογίσθηκε για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) εφαρμογή της σταγόνας, για κάθε καλλιεργητική περίοδο (FC: υδατοϊκανότητα, LAM: ελάχιστη επιτρεπόμενη υγρασία, RAW: ωφέλιμη υγρασία, ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά).

5.3.2. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

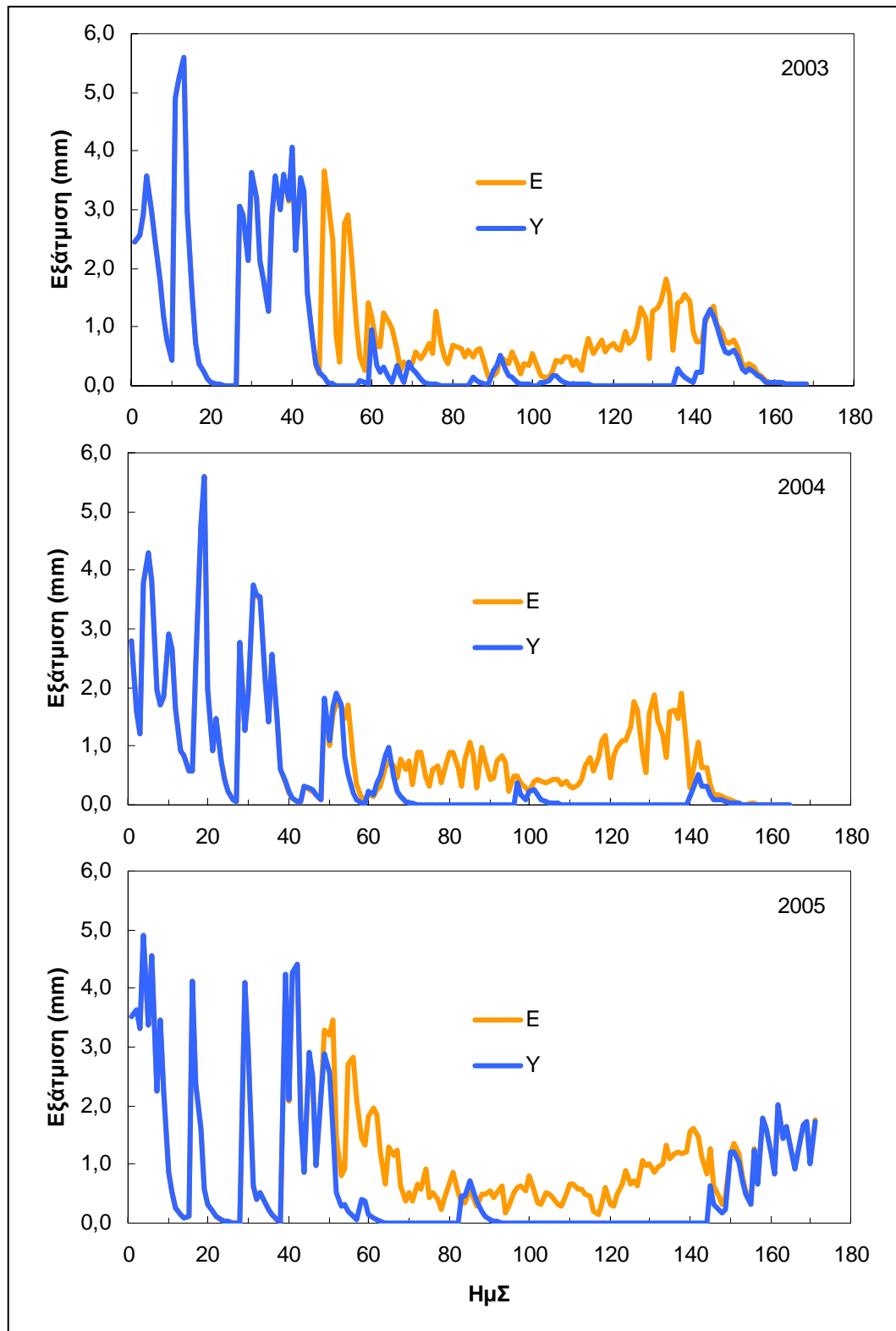
Η διακύμανση της εξάτμισης για κάθε καλλιεργητική περίοδο δίδεται στην Εικόνα 5.11. Η εξάτμιση ήταν η ίδια για την επιφανειακή και την υπόγεια στάγδην έως την έναρξη των αρδεύσεων μεταχείρισης, αφού η διαβροχή του εδάφους ήταν πλήρης και στις δύο περιπτώσεις είτε λόγω βροχής είτε λόγω της άρδευσης με καταιονισμό που χρησιμοποιήθηκε για το φύτρωμα της καλλιέργειας. Η διακύμανση της εξάτμισης κατά την περίοδο αυτή ήταν μεγάλη αφού το δυναμικό εξάτμισης είναι μεγάλο λόγω της μικρής φυτοκάλυψης.

Οι τιμές της εξάτμισης ήταν χαμηλές και στις τρεις περιόδους κατά τη διάρκεια του τρίτου και τέταρτου σταδίου αφού κατά τη διάρκεια αυτών η εδαφοκάλυψη βρίσκεται στο μέγιστό της (πλήρης). Η εξάτμιση από τα τεμάχια που αρδεύονταν με την υπόγεια σταγόνα όμως, ήταν σχεδόν μηδενική κατά την διάρκεια του δεύτερου και τρίτου σταδίου αφού μέσω της υπόγειας εφαρμογής του νερού το επιφανειακό στρώμα του εδάφους παρέμενε ξηρό με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της εξάτμισης από αυτό.

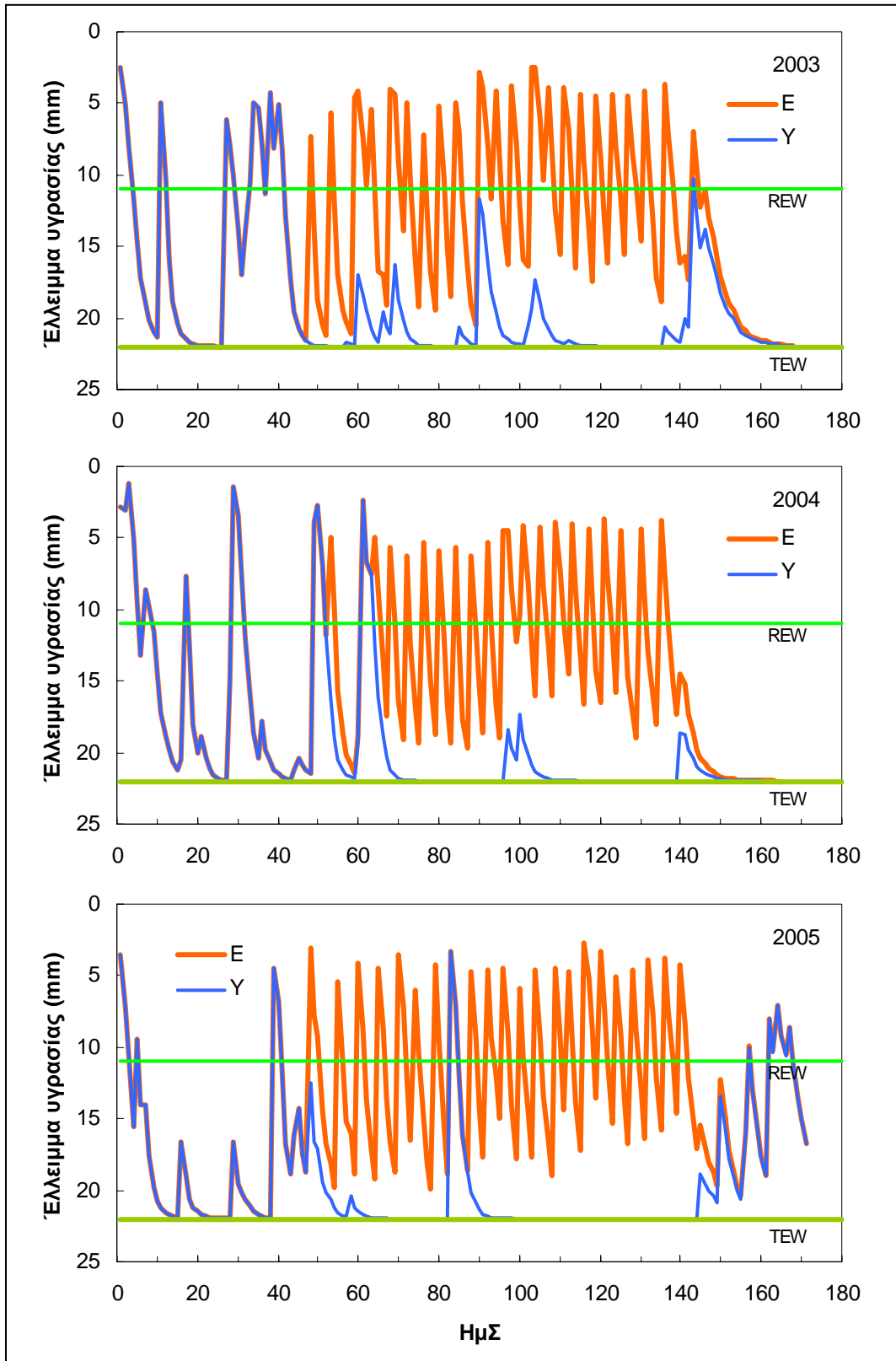
Οι υπολογισμένες τιμές της εξάτμισης κατά την διάρκεια αρδεύσεων μεταχείρισης του έτους 2003 ήταν 174 και 107 mm για την ΕΣΑ και την ΥΣΑ αντιστοίχως, 156 και 95 mm το έτος 2004 και 136 και 77 mm το έτος 2005. Ως ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής η εξάτμιση αποτέλεσε το 21% της εξατμισοδιαπνοής στην επιφανειακή στάγδην ενώ έφθασε το 13,6% στην υπόγεια άρδευση.

Η διαφοροποίηση της εξατμισοδιαπνοής λόγω της μη διαβροχής του επιφανειακού στρώματος του εδάφους στην υπόγεια άρδευση φαίνεται και στην Εικόνα 5.12 όπου παρουσιάζεται η υπολογισμένη εξάντληση της εδαφικής υγρασίας από το επιφανειακό στρώμα. Γίνεται φανερό ότι κατά την διάρκεια των αρδεύσεων μεταχείρισης και κυρίως κατά την περίοδο μικρής φυτοκάλυψης το διαθέσιμο νερό για εξάτμιση από το επιφανειακό στρώμα στην περίπτωση της υπόγειας εφαρμογής είναι μόνον αυτό που προέρχεται από την βροχή.

Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας υπολογισμού της ΕΤ που ακολουθήθηκε και της δόσης άρδευσης που προέκυψε και εφαρμόσθηκε, επιτεύχθηκε σημαντική εξοικονόμηση αρδευτικού νερού στην υπόγεια στάγδην άρδευση σε σχέση με την επιφανειακή. Το ποσοστό του νερού που εξοικονομήθηκε για κάθε αρδευτική περίοδο ανήλθε στο 13,2% το 2003, στο 11,2% το 2004 και στο 11,5% το 2005.



Εικόνα 5.11: Η διακύμανση της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους όπως υπολογίσθηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση (ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σορά).



Εικόνα 5.12: Το έλλειμμα υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους όπως υπολογίσθηκε για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους για την επιφανειακή (E) και την υπόγεια (Y) στάγδην άρδευση (TEW: συνολικό εξατμίσσιμο νερό, REW: ευκόλως εξατμίσσιμο νερό, ΗμΣ: Ημέρες μετά τη σπορά).

5.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αρδεύσεις

Τα αποτελέσματα για την επιφανειακή στάγδην άρδευση συμφωνούν με τις εκτιμήσεις που δίνει η Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, με βάση την μελέτη πειραματικών αποτελεσμάτων, για τις συνολικές ανάγκες των ζαχαρότευτλων σε νερό. Σύμφωνα με αυτά, οι συνολικές ανάγκες των ζαχαρότευτλων σε νερό στο διάστημα μιας καλλιεργητικής περιόδου, με στόχο την οικονομικότερη απόδοση, ανέρχονται σε 610 m³ στρ⁻¹ στην πεδιάδα της Θεσσαλίας. Οι διακυμάνσεις προς τα πάνω ή προς τα κάτω, που οφείλονται στις μεταβολές του καιρού από χρόνο σε χρόνο, είναι περιορισμένες σε ποσοστό περίπου ±10% (EBZ, 1997).

Η Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη (1996) υπολόγισε την υδατοκατανάλωση των ζαχαροτεύτλων για την Μαγνησία σε 700 mm. Ο Analogides (1993), καθώς και ο Morillo-Velarde (2001), αναφέρουν ότι στην λεκάνη της Μεσογείου, κατά τους θερινούς μήνες, απαιτείται εφαρμογή νερού στην καλλιέργεια των ζαχαροτεύτλων μέχρι και 800 mm για να αντισταθμιστούν οι απώλειες που οφείλονται στην εξατμισοδιαπνοή.

Εξοικονόμηση νερού

Πολλές από τις δημοσιευμένες έρευνες αξιολόγησης μεθόδων υπολογισμού των αναγκών σε αρδευτικό νερό στην υπόγεια στάγδην ξεκίνησαν πιθανόν για να προσδιορίσουν αν η μειωμένη εξάτμιση θα είχε μια μετρούμενη επίδραση στην δόση ή στον προγραμματισμό της άρδευσης και κατ' επέκταση αν βελτιώνει την αποδοτικότητα της μεθόδου. Τα αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί δεν απαντούν αυτήν την ερώτηση καταληκτικά – σε κάποιες περιπτώσεις σημειώθηκαν μειώσεις στις αρδευτικές ποσότητες που χρειάστηκαν αλλά όχι σε κάποιες άλλες (Camp et al., 1998).

Παρά ταύτα, οι Phene et al. (1989) και οι Howell et al. (1997) ανέφεραν τιμές ET_c για ΥΣΑ ίδιες με αυτές που άλλων αρδευτικών συστημάτων για καλλιέργειες τομάτας και αραβοσίτου. Οι Lamm et al. (1995a) συνέκριναν μοντέλα υδατοκατανάλωσης θεωρώντας αμελητέα την εξάτμιση κατά την άρδευση από πηγή τοποθετημένη στα 40 – 45 cm. Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν πως η χρήση της ΥΣΑ παρέχει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση νερού αφού μπορεί να μειώσει το μέγεθος των εκροών από το έδαφος και δη τις απώλειες λόγω εξάτμισης από αυτό, χωρίς όμως να παρουσιάζουν μετρημένα ή υπολογισμένα μεγέθη.

Δεν υπάρχει πιθανόν καθολική απάντηση επειδή μπορεί να επιδρούν αρκετοί παράγοντες: η ποσότητα της επιφανειακής διαβροχής είτε από την άρδευση είτε από τη βροχή, ο βαθμός ανάπτυξης του φυλλώματος κατά την βλαστική περίοδο και η επίδραση της βροχόπτωσης και/ή της άρδευσης στην ανάπτυξη και δραστηριότητα των ριζών. Η επίτευξη αυξημένης αποδοτικότητας εφαρμογής με την υπόγεια στάγδην εξαρτάται από το πόσο καλά η άρδευσης καλύπτει τις απαιτήσεις της καλλιέργειας σε νερό (Camp et al., 1998).

Στην παρούσα έρευνα, έγινε προσπάθεια να διαχωριστούν οι εισροές και οι εκροές νερού από το σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα στα διάφορα συνθετικά του υδατικού ισοζυγίου έτσι ώστε να γίνει εφικτή η ρεαλιστική σύγκριση των μεθόδων άρδευσης. Για να γίνει η σύγκριση, οι παράμετροι του ισοζυγίου πρέπει να μετρηθούν ή να υπολογισθούν. Οι μετρημένες σε αυτήν την έρευνα παράμετροι είναι η βροχόπτωση, η άρδευση, ενώ το διαθέσιμο εδαφικό νερό, η διαπνοή, η εξάτμιση από το έδαφος, η απορροή και η βαθειά διήθηση υπολογίσθηκαν.

Η εξάτμιση και η διαπνοή, μολονότι ξεχωριστές παράμετροι, συνήθως υπολογίζονται συνολικά ως εξατμισοδιαπνοή λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας για ξεχωριστή εκτίμηση. Η εκτίμηση αυτών όμως, είναι πολύ σημαντική διότι η διαπνοή μεταφράζεται σε παραγωγή της καλλιέργειας, η εξάτμιση όμως όχι.

Στην διατριβή αυτή μελετώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση (E) και το σχετικό ποσοστό αυτής στην συνολική εξατμισοδιαπνοή απαντώντας στο ερώτημα πότε και πως η εξάτμιση εμφανίζεται και ποιό είναι το μέγεθός της. Η περισσότερη απώλεια από εξάτμιση εμφανίζεται νωρίς στην περίοδο όπου τα φυτά είναι μικρά. Η εξάτμιση ήταν χαμηλή κατά τη διάρκεια του τρίτου και τέταρτου σταδίου αφού κατά τη διάρκεια αυτών η εδαφοκάλυψη βρίσκεται στο μέγιστό της. Επιπρόσθετες απώλειες λόγω εξάτμισης εμφανίζονται μετά από βροχοπτώσεις φθάνοντας στο ίδιο ύψος και στις δύο μεθόδους. Η εξάτμιση ως ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής έφθασε το 22,7%. Αυτό μπορεί να αποτελέσει κριτήριο εφαρμογής διαφόρων μέτρων μείωσής της, από τον σχεδιασμό και την διαχείριση των αρδεύσεων.

Η μέθοδος του FAO-56 με τον διπλό φυτικό συντελεστή υπολογίζει την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό καθίσταται ιδιαίτερος χρήσιμο για μελέτες που επιδιώκουν την βελτιστοποίηση της απόδοσης της καλλιέργειας μειώνοντας το κλάσμα της ET που οφείλεται στην εξάτμιση από το έδαφος. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στην περίπτωση της ΥΣΑ προσέφερε την δυνατότητα αξιολόγησης των μεθόδων.

Λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς την εξάτμιση από το επιφανειακό έδαφος και θεωρώντας πως στις υπόγειες μεταχειρίσεις το στρώμα των 10 cm δεν διαβρεχόταν από την άρδευση παρά μόνον από την βροχή, η δόση άρδευσης ήταν μικρότερη στην επιφανειακή άρδευση για την ίδια συχνότητα. Η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού που επιτεύχθηκε στην υπόγεια στάγδην σε σχέση με την επιφανειακή ανήλθε στο 12%. Η εξοικονόμηση αυτή υποδεικνύει σημαντικό όφελος από επενδύσεις σε μεθόδους που δίδουν την δυνατότητα μείωσης της εξάτμισης, όπως είναι η επένδυση στην υπόγεια στάγδην άρδευση.

Επίδραση της άρδευσης στην ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται τα αποτελέσματα της άρδευσης στην ανάπτυξη της καλλιέργειας ήτοι στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας και τη μεταβολή της φυτικής μάζας. Μελετάται η τελική απόδοση της καλλιέργειας τόσο από άποψη παραγωγικών όσο και ποιοτικών χαρακτηριστικών και γίνεται αξιολόγηση των μεθόδων και των τεχνικών άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν ως προς την αποδοτικότητα της χρήσης νερού, τόσο για την παραγωγή ριζών, όσο και την παραγωγή ζάχαρης.

6.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

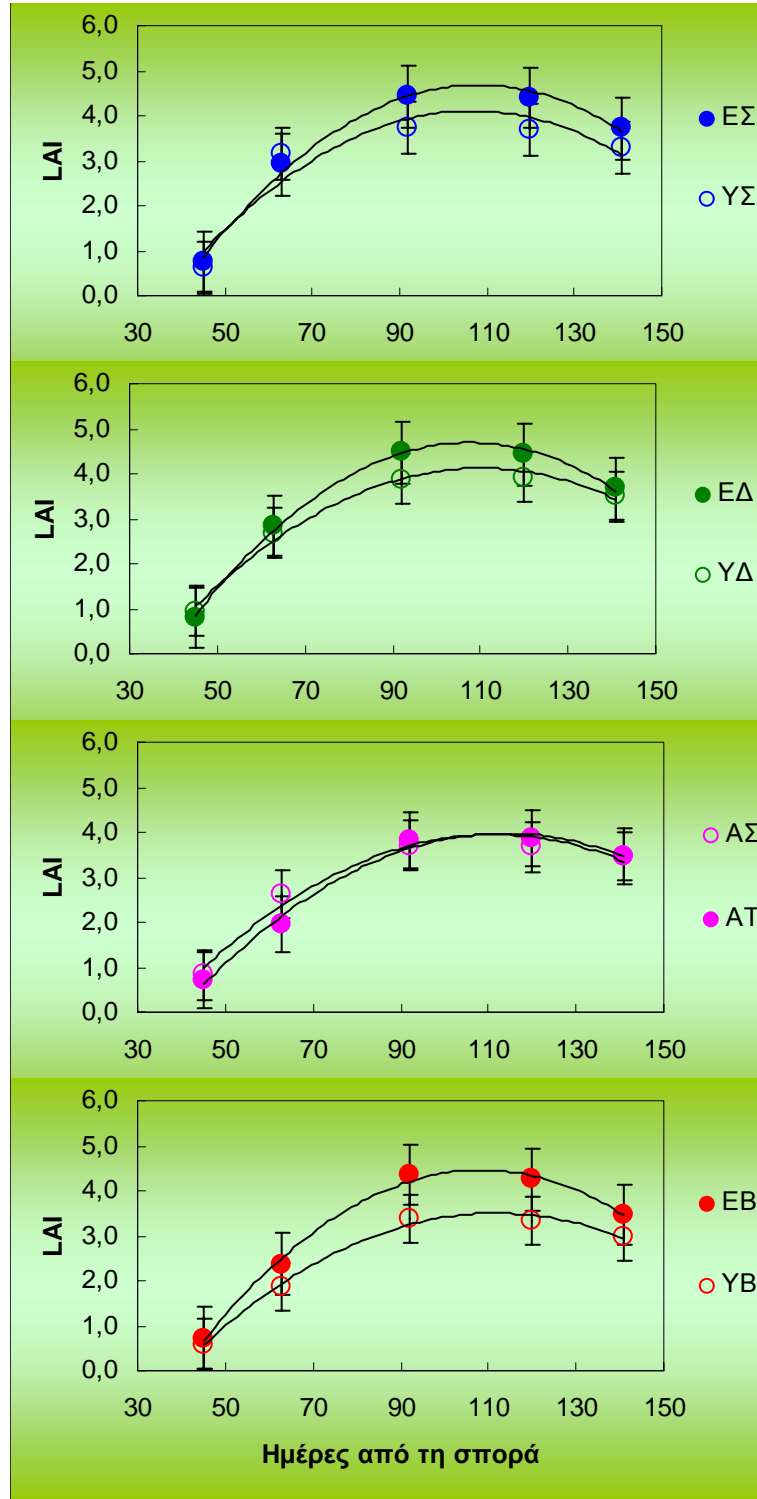
6.2.1. ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Στις Εικόνες 6.1α-γ, παρουσιάζεται η εξέλιξη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) για κάθε μεταχείριση κατά τη διάρκεια των τριών καλλιεργητικών περιόδων. Γενική διαπίστωση αποτελεί η διακύμανση του LAI σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως σε σχέση με τις επιφανειακές. Και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους, τα ζαχαρότευτλα παρουσιάζουν τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης έως και την 60ή περίπου ημέρα από την σπορά και κατόπιν παρατηρείται η προς τα κάτω διαφοροποίηση των υπόγειων μεταχειρίσεων. Πρόκειται για την χρονική περίοδο που αρχίζει λίγο μετά την έναρξη των αρδεύσεων μεταχείρισης. Φαίνεται πως η παροχή νερού σε τμήμα του ήδη ανεπτυγμένου ριζικού συστήματος της καλλιέργειας υπό την ΥΣΑ, επηρέασε τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

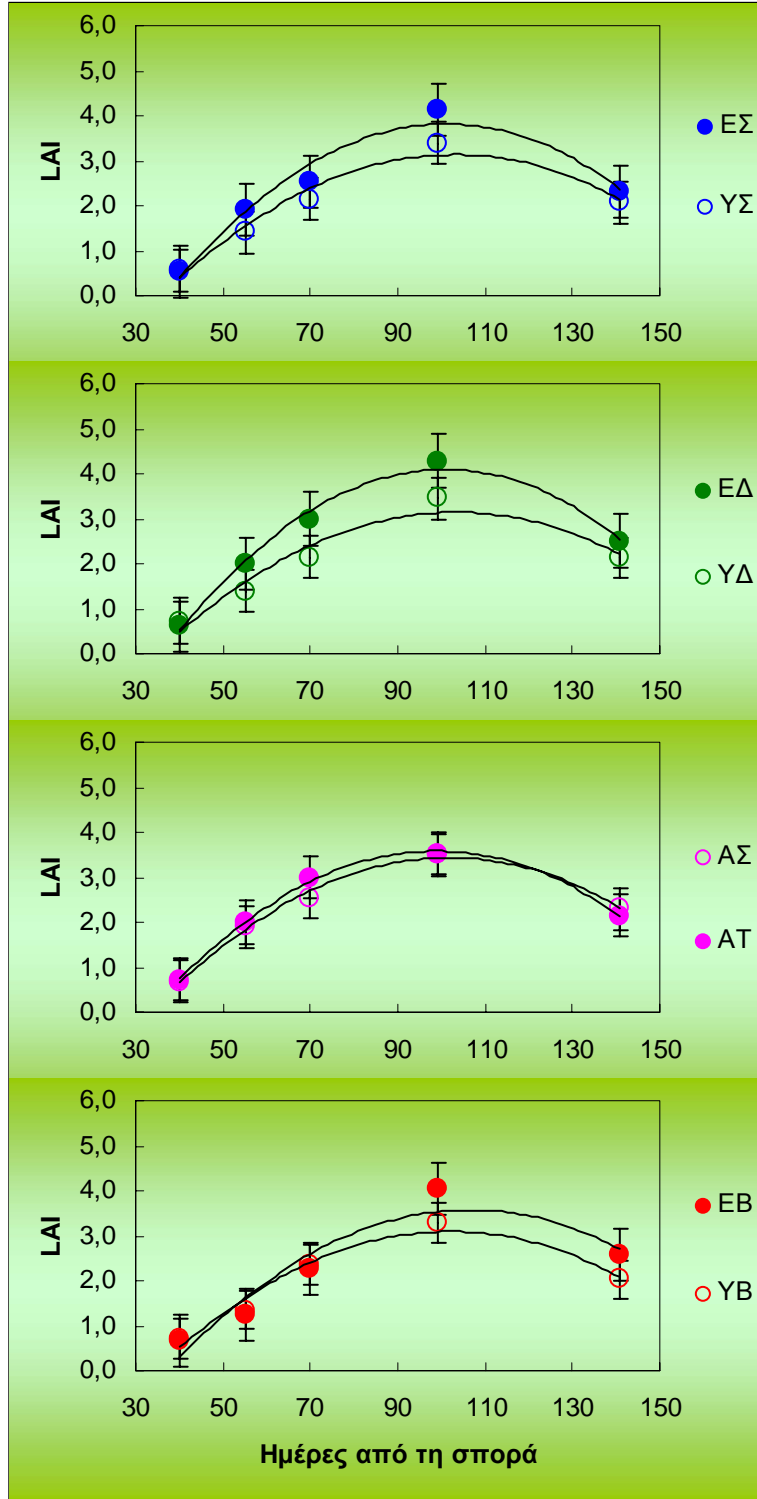
Προϊόντος του χρόνου, ο LAI φαίνεται να επανακάμπτει στις υπόγειες μεταχειρίσεις και να φθάνει σχεδόν στα επίπεδα των επιφανειακών μεταχειρίσεων, ένα μήνα περίπου πριν τη συγκομιδή. Σε όλες τις μεταχειρίσεις και κατά το μέσο στάδιο ανάπτυξης η τιμή του LAI κυμάνθηκε σε επίπεδα υψηλότερα του 3.

Η μέση μέγιστη τιμή για τις επιφανειακές μεταχειρίσεις ήταν 4,35 το 2003, 4,14 το

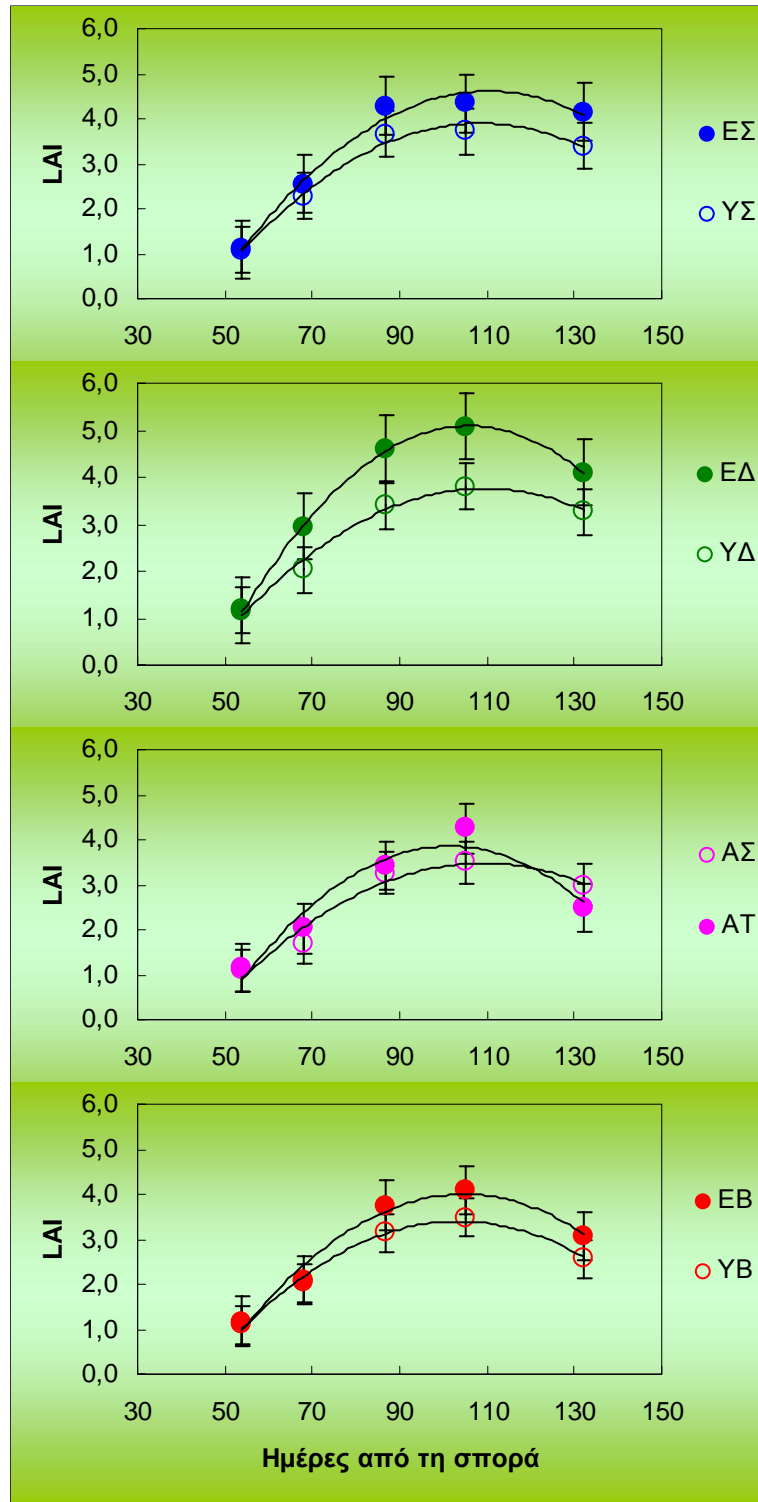
2004 και 4,50 κατά το 2005. Οι αντίστοιχες μέσες τιμές για τις υπόγειες μεταχειρίσεις ήταν 3,70, 3,43 και 3,75 αντιστοίχως.



Εικόνα 6.1α: Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2003.



Εικόνα 6.1β: Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2004.



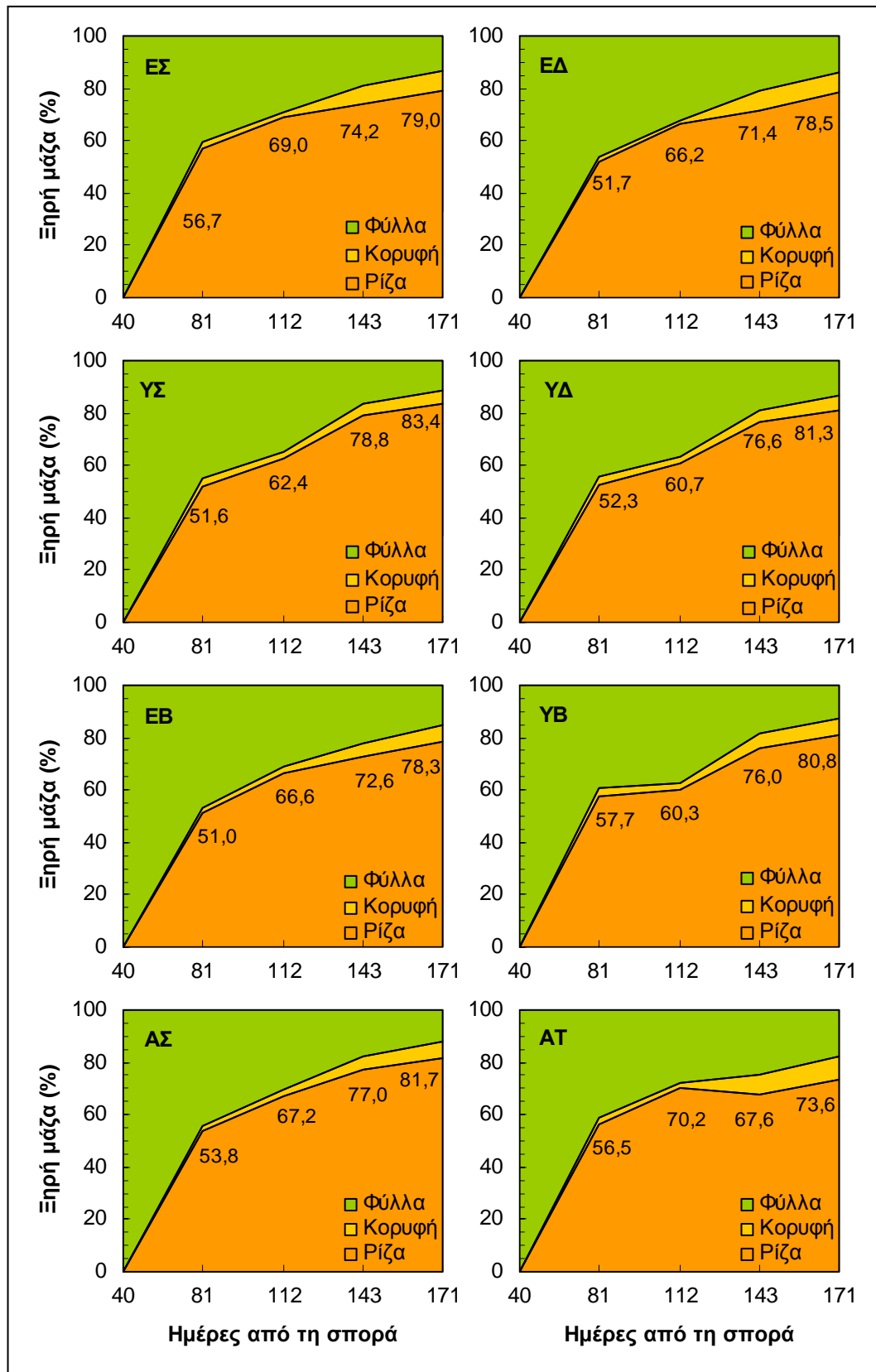
Εικόνα 6.1γ. Τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) όπως μετρήθηκαν το έτος 2005.

6.2.2. ΣΧΕΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΡΙΖΩΝ - ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΙ ΚΟΡΥΦΩΝ

Το βάρος των φύλλων και των κορυφών στις αρδευόμενες υπογείως μεταχειρίσεις, ήταν στις περισσότερες δειγματοληψίες χαμηλότερο από αυτό των επιφανειακών, καθ' όλη την διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις διαφορές που βρέθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζεται η αναλογία ξηρής μάζας ριζών-κορυφών-φύλλων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Το ποσοστό της μάζας των ριζών στη συνολική ξηρή μάζα δεν παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Εμφανίζεται όμως μια μικρή, πλην σαφής, υπεροχή των υπόγειων μεταχειρίσεων. Το τελικό αυτό ποσοστό (συγκομιδή) έφθασε το 79% στην μεταχείριση ΕΣ ενώ υπερέβη το 83% στη ΥΣ.

Η σύγκριση των μεταχειρίσεων συνεχούς και διακοπτόμενης άρδευσης δείχνει μίαν υπεροχή της συνεχούς άρδευσης και στην επιφανειακή (ΕΣ) και στην υπόγεια (ΥΣ) εφαρμογή, όχι όμως στατιστικά σημαντική.



Εικόνα 6.2: Συμμετοχή των ριζών στην ξηρή μάζα του φυτού κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, για τα τρία έτη πειραματισμού.

6.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ**6.3.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΙΖΩΝ****Βάρος ριζών**

Στις Εικόνες 6.3α-δ, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στρεμματικής απόδοσης σε βάρος ριζών για κάθε έτος πειραματισμού. Οι τιμές είναι ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη. Δίδεται επίσης η διαφοροποίηση της απόδοσης σε κάθε μεταχείριση ως ποσοστό της απόδοσης της επιφανειακής συνεχόμενη (ΕΣ) που θεωρείται η συμβατική.

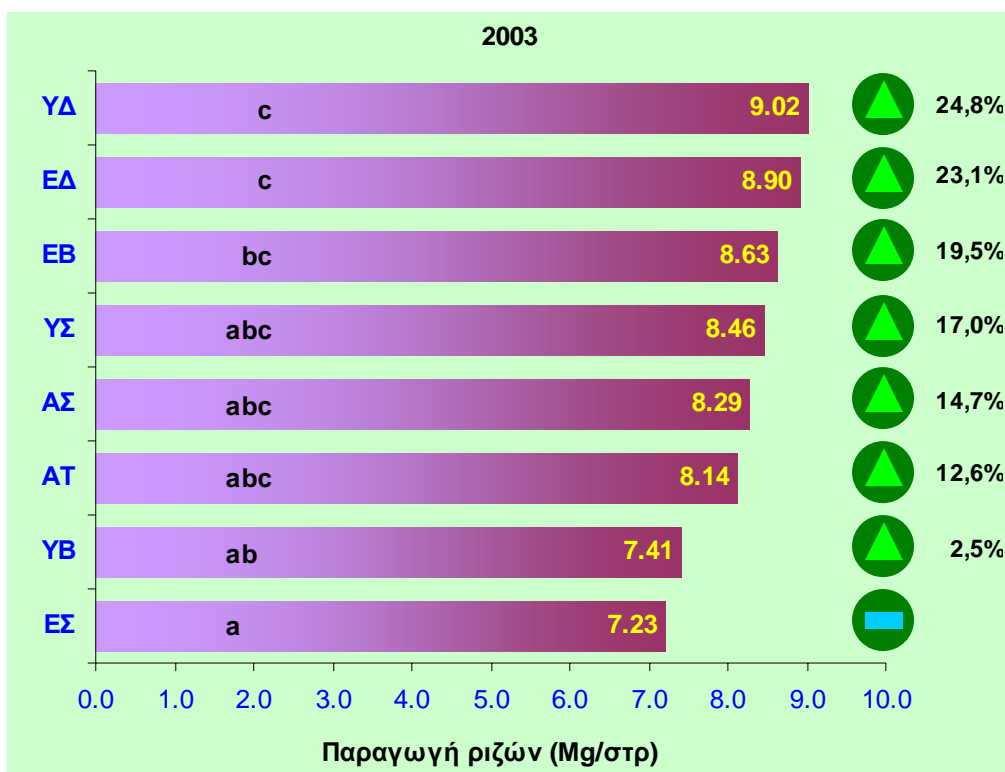
Και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Η αύξηση στην απόδοση της διακοπτόμενης υπόγειας στάγδην άρδευσης (ΥΔ) σε σχέση με την συμβατική (ΕΣ) έφθασε ένα μέσο ποσοστό για τα τρία έτη περίπου 20%. Η ΥΔ υπερέιχε και ακολούθησε η ΕΔ. Στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο (2003) η διακοπτόμενη υπόγεια άρδευση (ΥΔ) έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών χωρίς όμως στατιστικώς σημαντική διαφορά.

Το 2004, η απόδοση της ΥΔ ήταν πάλι η υψηλότερη διαφέροντας στατιστικώς σημαντικά με τις μεταχειρίσεις που έδωσαν την μικρότερη παραγωγή σε βάρος ριζών, ήτοι των δύο μεταχειρίσεων εφαρμογής αέρα. Κατά την συγκομιδή του έτους 2005, η διαφοροποίηση της απόδοσης μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν εντονότερη παρουσιάζοντας στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των σε αρκετές περιπτώσεις. Οι δύο μεταχειρίσεις διακοπτόμενης άρδευσης υπερέιχαν και πάλι έναντι των υπολοίπων.

Ανάμεσα στις επιφανειακές μεταχειρίσεις ΕΔ και ΕΣ, είναι χαρακτηριστική η υπεροχή της μεταχείρισης ΕΔ αλλά χωρίς σημαντική διαφορά. Το ίδιο παρατηρείται και ανάμεσα στις μεταχειρίσεις ΥΔ και ΥΣ αλλά με σημαντική διαφορά μόνον κατά το τρίτο έτος.

Μεταξύ των μεταχειρίσεων ΕΒ και ΕΣ υπάρχει σχετική υπεροχή της ΕΒ, πλην όμως όχι στατιστικώς σημαντική. Στην περίπτωση των μεταχειρίσεων εφαρμογής αέρα, η συνεχής εφαρμογή (ΑΣ), έδωσε μεγαλύτερη απόδοση και τα τρία έτη, παρουσιάζοντας στατιστικώς σημαντική διαφορά μόνο κατά το τρίτο έτος, όπου η ΑΣ έφθασε σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τα προηγούμενα έτη.

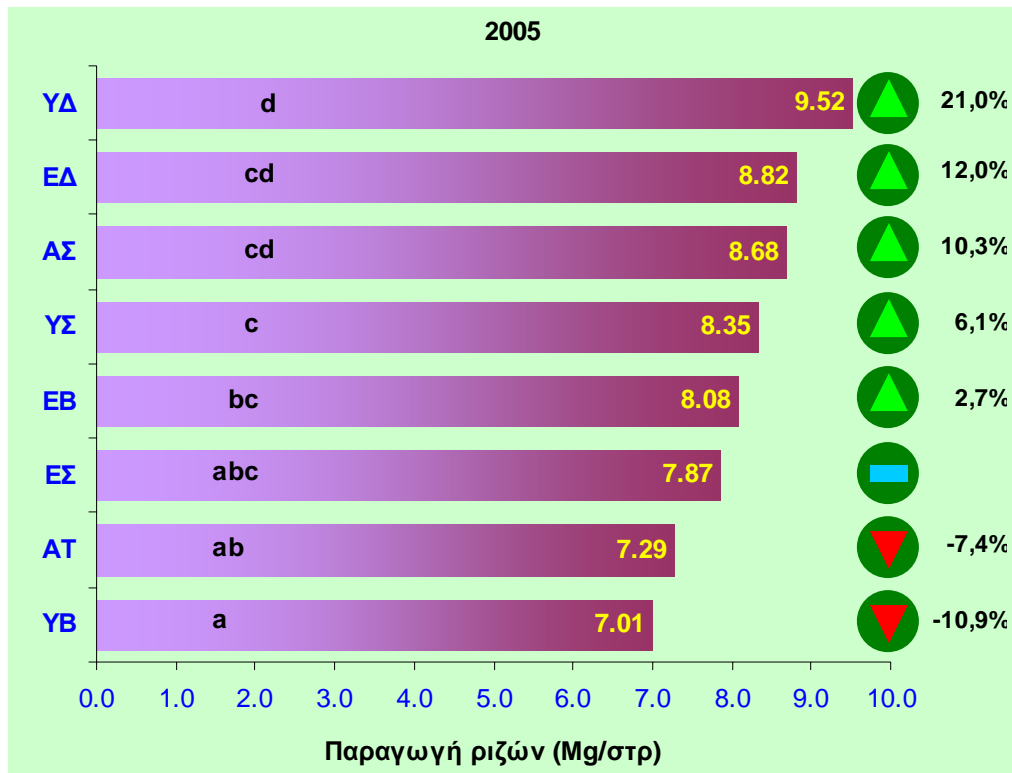
Η μεταχείριση της υπόγειας στάγδην χαμηλής παροχής (ΥΒ) φαίνεται να υστερεί σε σχέση με τις υπόλοιπες, αφού η μέση απόδοσή της για τα τρία έτη ήταν η χαμηλότερη.



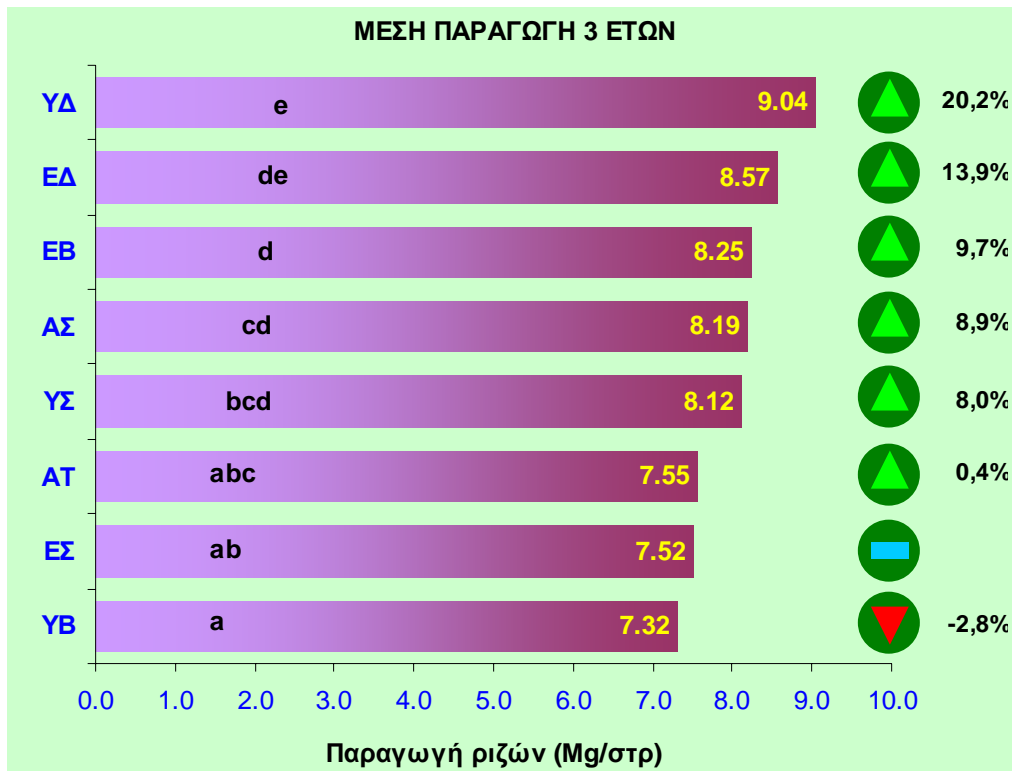
Εικόνα 6.3α: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2003.



Εικόνα 6.3β: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2004.



Εικόνα 6.3γ: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για το έτος 2005.



Εικόνα 6.3δ: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ριζών για κάθε μεταχείριση και ποσοστιαία διαφοροποίηση σε σχέση με την επιφανειακή (συμβατική) στάγδην για τα 3 έτη.

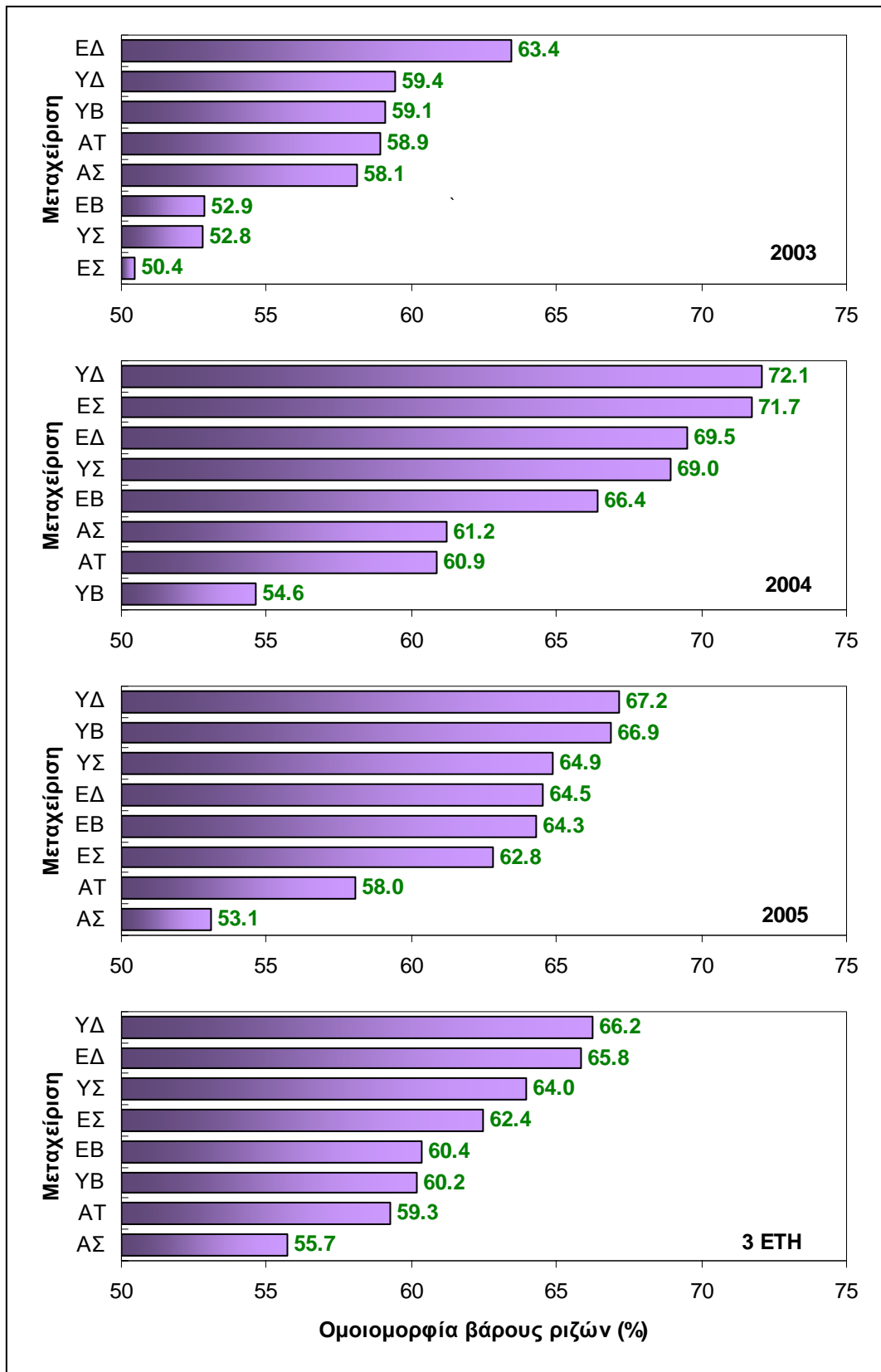
Η Εικόνα 6.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ομοιομορφίας των ριζών των ζαχαροτεύτλων ως προς το βάρος τους. Η προσέγγιση αυτή δίδει μιαν εικόνα των συνθηκών ανάπτυξης της καλλιέργειας, αφού σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της κατανομής της εδαφικής υγρασίας που παρατίθενται στο κεφάλαιο 7, εξηγούν εν μέρει την απόδοση των διαφόρων μεταχειρίσεων.

Φαίνεται πως οι μεταχειρίσεις με διακοπτόμενη άρδευση, έδωσαν ρίζες με την χαμηλότερη παραλλακτικότητα σε βάρος, ενώ η άρδευση με συνεχή παροχέτευση αέρα (ΑΣ) έδωσε συστηματικά χαμηλές ομοιομορφίες, γεγονός όμως που αν ληφθεί υπόψη η καλή απόδοση της μεταχείρισης σε βάρος ριζών, υποδηλώνει την δυναμική της τεχνικής (υπό συνθήκες βελτιωμένης κατανομής του νερού).

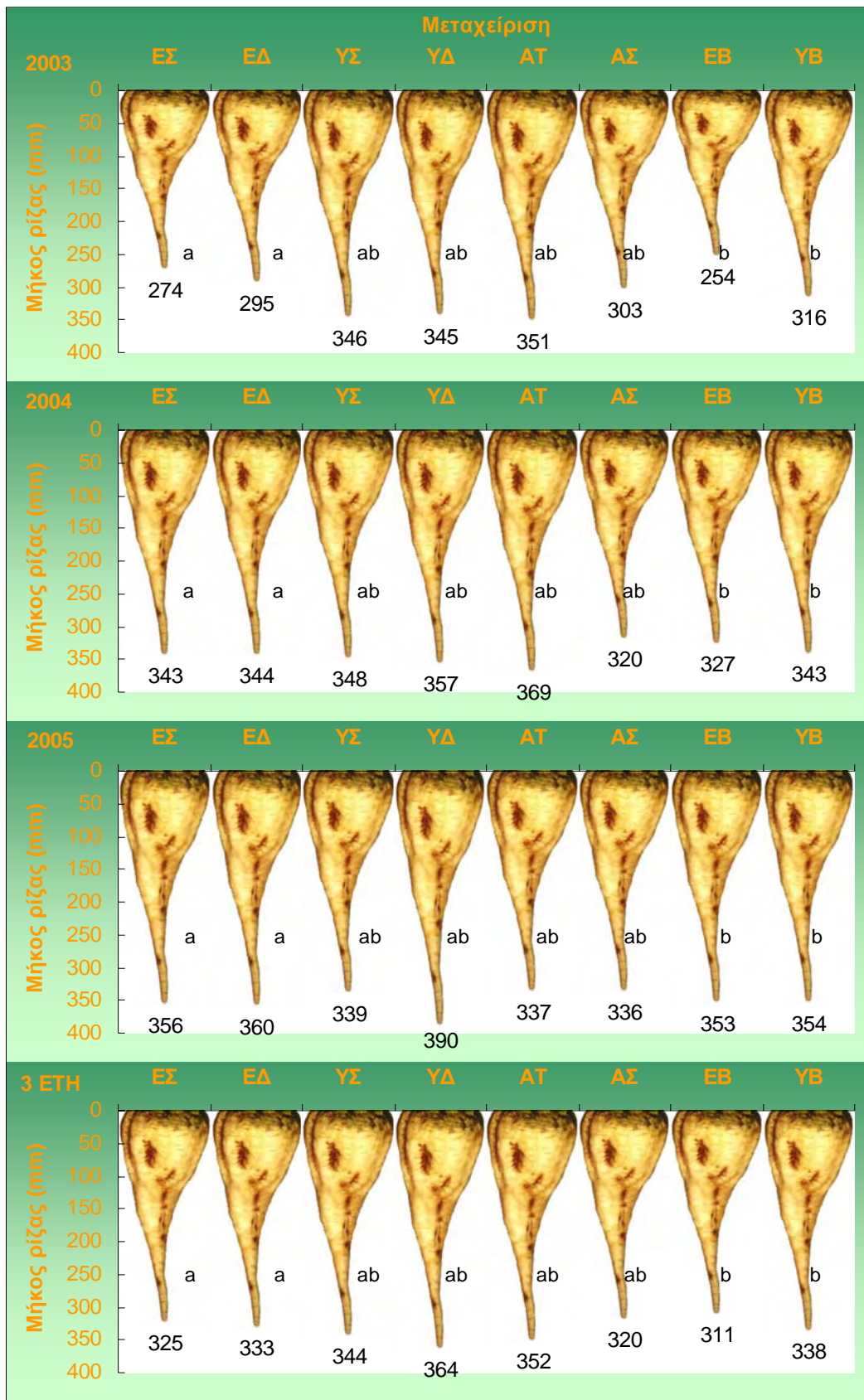
Στην Εικόνα 6.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μήκους της κύριας ρίζας των ζαχαροτεύτλων που συλλέχθηκαν. Γενικώς, δεν καταγράφεται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων, παρ' ότι υπάρχει μια υπεροχή των υπόγειων έναντι των επιφανειακών τεχνικών.

Στην Εικόνα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μέσης διαμέτρου των ριζών των ζαχαροτεύτλων που συλλέχθηκαν σε κάθε μεταχείριση. Η επιφανειακή διακοπτόμενη τεχνική (ΕΔ) φαίνεται πως υπερείχε της συμβατικής (ΕΣ) αφού εκτός της περίπτωσης των διαμέτρων της κλάσης των 100 cm, είχε γενικά μεγαλύτερης διαμέτρου ρίζες. Στην περίπτωση των μεταχειρίσεων διακοπτόμενης άρδευσης, η ΥΔ έδωσε μεγαλύτερες διαμέτρους αφού παρουσίασε υψηλότερη συχνότητα από τα 100 cm και επάνω. Η επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής (ΕΒ) ήταν αυτή που κατέγραψε μεγαλύτερη συχνότητα από 100 cm και επάνω σε σχέση με την ΥΒ, ενώ, μεταξύ των μεταχειρίσεων παροχέτευσης αέρα, η ΑΣ υπερείχε κατά τι, αφού παρουσίασε αρκετά υψηλότερη συχνότητα κυρίως στις διαμέτρους κλάσης 100 cm.

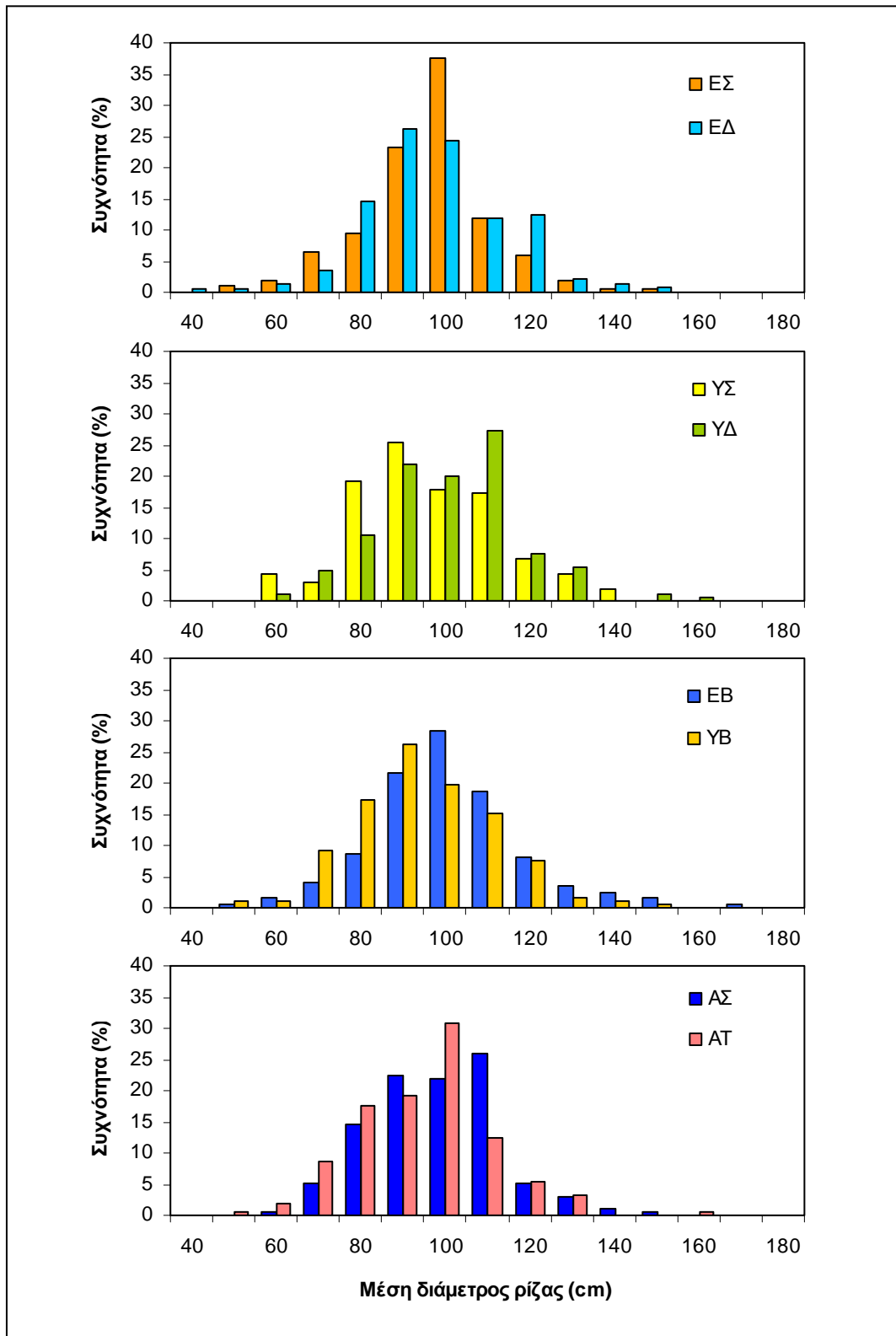
Πρέπει να σημειωθεί πως τα δεδομένα του μήκους και της διαμέτρου των ριζών δεν αποτελούν μετρήσεις ανάπτυξης της ρίζας των ζαχαροτεύτλων στη ζώνη του ριζοστρώματος, παρά μια διαστατική προσέγγιση των παραγωγικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 6.4: Ομοιομορφία βάρους ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση ομοιομορφία βάρους για τα τρία έτη.



Εικόνα 6.5: Μήκος ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέσο μήκος για τα τρία έτη.



Εικόνα 6.6: Συχνότητα διαμέτρου ριζών για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους.

6.3.2. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ζαχαρικός τίτλος

Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων των ζαχαροτεύτλων που λήφθησαν κατά την συγκομιδή κάθε καλλιεργητικής περιόδου όσον αφορά στον ζαχαρικό τίτλο.

Κατά τις δύο πρώτες καλλιεργητικές περιόδους δεν παρατηρείται συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Διαφοροποίηση παρουσιάζεται κατά το τρίτο έτος, κατά το οποίο ο ζαχαρικός τίτλος κυμάνθηκε γενικώς στα χαμηλότερα επίπεδα του τριετούς πειραματισμού.

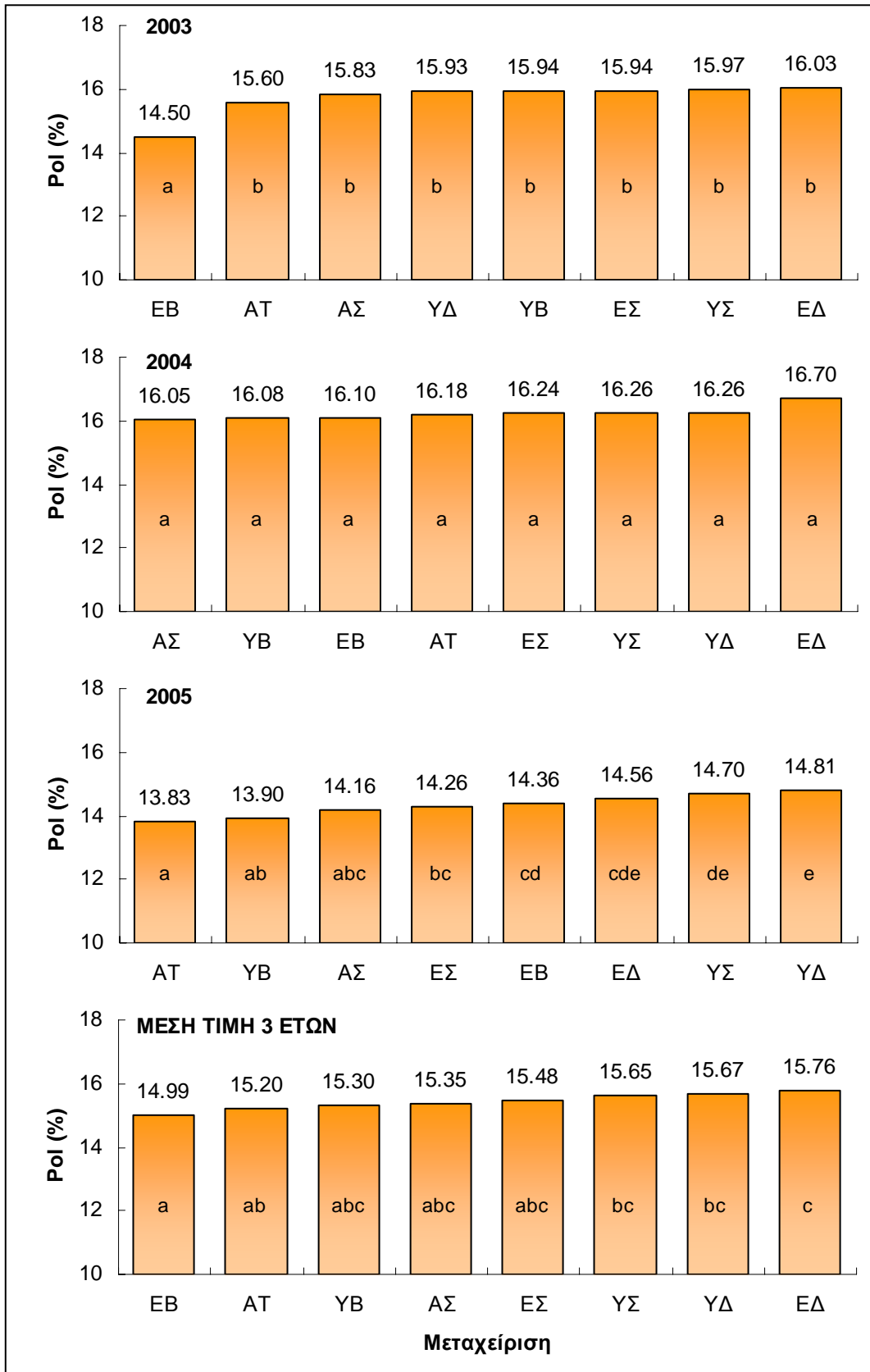
Στρεμματοζάχαρο

Η παραγωγή ζάχαρης για κάθε μεταχείριση παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8 για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους. Η απόδοση σε ζάχαρη έδωσε ανάλογα αποτελέσματα με αυτά της απόδοσης σε βάρος ριζών, αφού η περιεκτικότητα σε ζάχαρη δεν παρουσίασε ιδιαίτερη διαφοροποίηση.

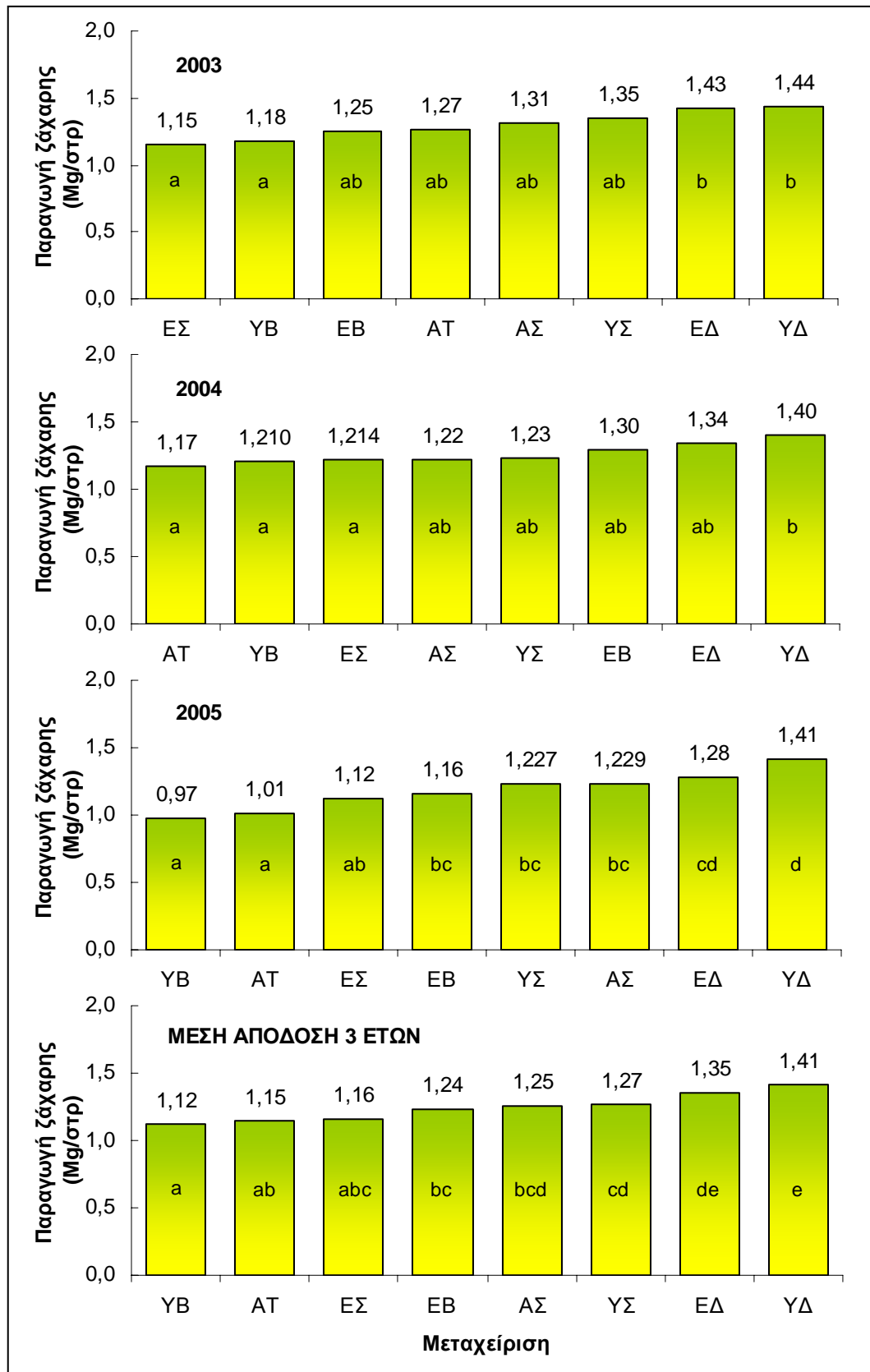
Έτσι, οι αρδευόμενες με διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις ΥΔ και ΕΔ έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα και τα τρία έτη. Η μεταχείριση ΥΔ έδωσε την υψηλότερη απόδοση σε ζάχαρη, φθάνοντας μια μέση τιμή για τα τρία έτη 1,41 τόνους ανά στρέμμα και ακολούθησε η ΕΔ με μέση απόδοση για τα τρία έτη 1,35 τόνους ανά στρέμμα.

Η υπεροχή της διακοπτόμενης εφαρμογής αντικατοπτρίζεται και στο υπολογισμένο οικονομικό όφελος που προέκυψε για κάθε μεταχείριση και παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.9. Ενώ η υπεροχή της διακοπτόμενης εφαρμογής είναι σαφής, δεν υπάρχει συστηματική διαφοροποίηση από εκεί και κάτω μεταξύ των υπολοίπων μεταχειρίσεων, οι οποίες ακολουθούν την τάση που παρατηρήθηκε στην παραγωγή ριζών, εκτός από την επιφανειακή στάγδην χαμηλής παροχής (ΕΒ), που λόγω μικρότερου ζαχαρικού τίτλου παρουσιάζει μειωμένη στρεμματική απόδοση σε ζάχαρη καθώς και πρόσοδο τα δύο πρώτα έτη.

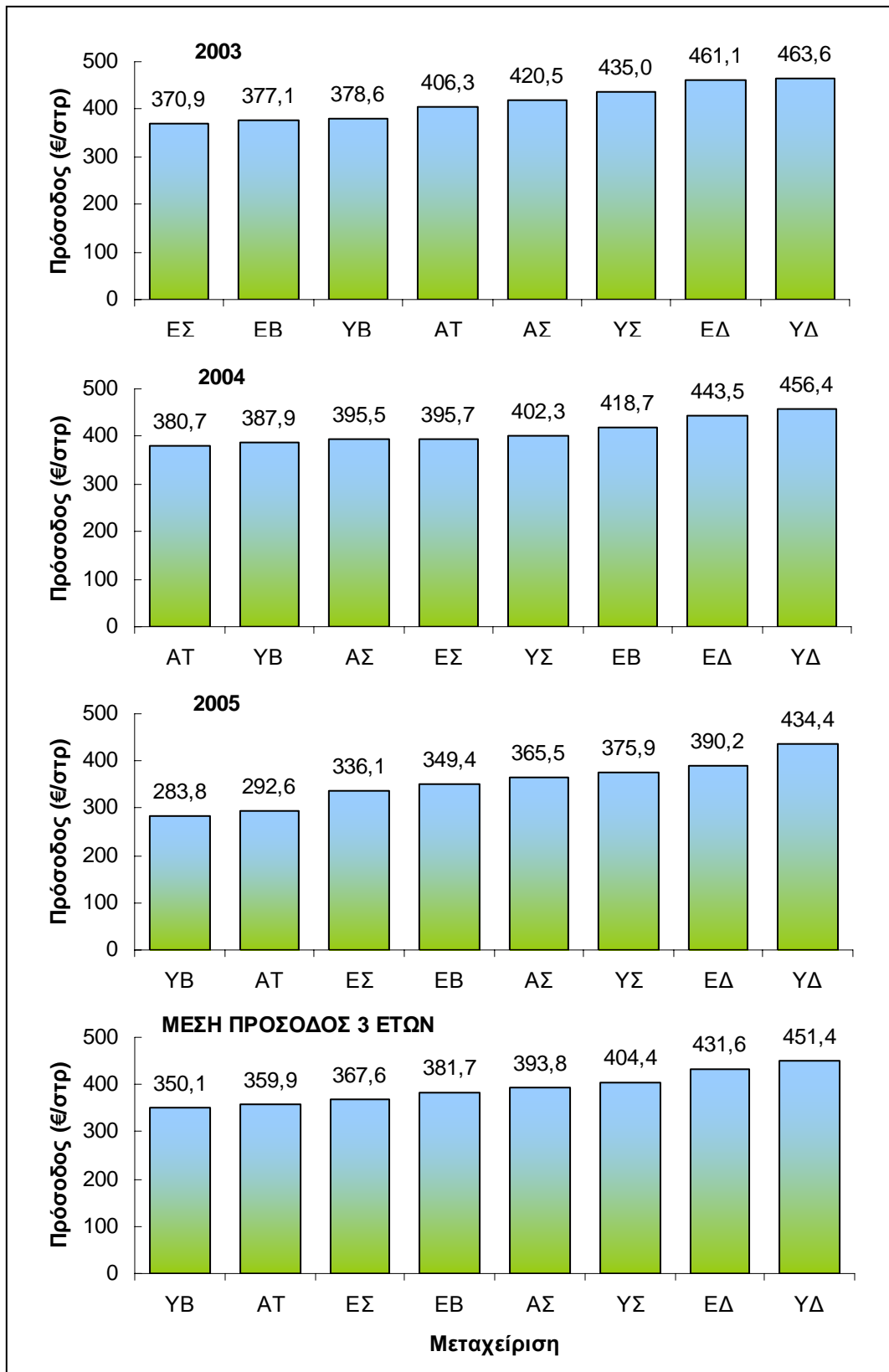
Ο υπολογισμός της χρηματικής αξίας της παραγωγής έγινε με βάση τον Πίνακα Τιμών Ζαχαροτεύτλων του έτους 2003 της Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης. Η παραγωγή πληρώνεται από την Ε.Β.Ζ. με βάση τον ζαχαρικό τίτλο που προσδιορίζεται σε κάθε φορτίο που παραλαμβάνεται.



Εικόνα 6.7: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές ζαχαρικού τίτλου για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση τιμή ζαχαρικού τίτλου για τα τρία έτη.



Εικόνα 6.8: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές παραγωγής ζάχαρης για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση παραγωγή ζάχαρης για τα τρία έτη.



Εικόνα 6.9: Ταξινομημένες κατά αύξουσα τάξη τιμές οικονομικής προσόδου για κάθε μεταχείριση για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους και μέση πρόσδοος για τα τρία έτη.

Μελασσογόνα συστατικά

Η περιεκτικότητα των στοιχείων K, Na και α-αμινο N στις ρίζες των ζαχαρότευτλων χρησιμοποιείται στην προσπάθεια περιγραφής της χημικής ποιότητας των ριζών και ως εκ τούτου στην διαδικασία ανάκτησης μεγαλύτερου ποσοστού ζάχαρης από τον χυμό κατά την διαδικασία της κρυστάλλωσης (Harvey and Dutton, 1993).

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του K στα δείγματα των ζαχαροτεύτλων. Η χαμηλότερη περιεκτικότητα παρατηρείται στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως, ενώ οι υψηλότερες συγκεντρώσεις (χωρίς σημαντική διαφορά) εμφανίζονται στη μεταχείριση EB το 2003 και το 2004 και στην ΑΣ το 2005.

Η κατάταξη των μεταχειρίσεων σε σχέση με τη μέση συγκέντρωση καλίου για τα τρία έτη ήταν EB>ΑΣ>ΕΣ>ΕΔ>ΥΒ>ΥΔ>ΥΣ>ΑΤ. Η χαμηλότερη συγκέντρωση παρατηρήθηκε στην μεταχείριση ΑΤ διαφέροντας σημαντικά από τις τέσσερις μεταχειρίσεις με την υψηλότερη συγκέντρωση. Η μεγαλύτερη τιμή K καταγράφηκε στην μεταχείριση EB με 1334 mg ανά 100 g ζάχαρης, η οποία διέφερε σημαντικά από τις μεταχειρίσεις με τις τέσσερις χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

Η περιεκτικότητα του Na στις ρίζες των τεύτλων για όλες τις μεταχειρίσεις φαίνεται στον Πίνακα 6.12. Η μεταχείριση επιφανειακής άρδευσης με χαμηλή πίεση (EB) εμφάνισε την υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις συγκέντρωση Na και τα τρία έτη πειραματισμού με τις άλλες δύο επιφανειακές μεταχειρίσεις (ΕΣ και ΕΔ) να ακολουθούν. Η μέση συγκέντρωση νατρίου για τα τρία έτη ήταν μεγαλύτερη για τις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις αφού η κατάταξη αυτών ήταν EB>ΕΔ>ΕΣ>ΥΔ>ΥΣ>ΑΣ>ΑΤ>ΥΒ, με την μεταχείριση EB να διαφέρει σημαντικά από τις υπόλοιπες.

Τέλος, στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του αμινο-N. Δεν καταγράφονται ιδιαίτερες σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η συγκέντρωση του αμινο-N παρουσιάζεται χαμηλή στη μεταχείριση της υπόγειας άρδευσης με χαμηλή παροχή (ΥΒ) και σε αυτήν της συνεχούς εφαρμογής αέρα (ΑΣ). Η περίπτωση της ΥΒ μπορεί να εξηγηθεί από την υπόθεση, ότι στη μεταχείριση αυτή ήταν μικρή η απορρόφηση και αξιοποίηση του αζώτου από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους, λόγω της μειωμένης υγρασίας στο στρώμα αυτό. Στην μεταχείριση αυτή παρατηρήθηκε η μικρότερη αύξηση της υγρασίας από την άρδευση στο επιφανειακό στρώμα και έτσι η διατήρηση της επιφάνειας του εδάφους ξηρής. Σύμφωνα με τους Tsialtas et al. (2001), η διαθεσιμότητα του ανόργανου αζώτου στο έδαφος κάτω από μεσογειακές συνθήκες, εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του νερού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1. Τιμές καλίου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης

Μεταχείριση	Συγκέντρωση K (mg / 100 g ζάχαρης)							
	2003	SE	2004	SE	2005	SE	3 ΕΤΗ	SE
ΕΣ	1355,6 ab ^(*)	48,6	1419,7 a	37,4	1134,7 ab	10,4	1303,3 bcd	29,6
ΕΔ	1268,2 ab	62,6	1376,3 a	17,5	1146,8 ab	56,7	1263,8 abcd	38,7
ΥΣ	1189,6 a	55,9	1409,6 a	18,6	1061,7 a	35,4	1220,3 a	12,5
ΥΔ	1201,3 a	96,1	1348,1 a	44,2	1131,8 a	31,5	1227,1 ab	31,4
ΕΒ	1400,2 a	102,5	1446,7 a	42,1	1156,4 ab	29,5	1334,4 d	39,8
ΥΒ	1221,8 ab	32,4	1423,6 a	56,8	1101,7 a	17,6	1249,1 abc	26,7
ΑΣ	1272,6 ab	32,5	1442,0 a	23,1	1229,7 b	23,4	1314,8 cd	8,2
ΑΤ	1182,7 a	16,5	1369,8 a	16,8	1063,2 a	36,2	1205,2 a	13,0

(*) Εγγραφές που περιέχουν ίδια γράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά. SE: Τυπικό σφάλμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2. Τιμές νατρίου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης

Μεταχείριση	Συγκέντρωση Na (mg / 100 g ζάχαρης)							
	2003	SE	2004	SE	2005	SE	3 ΕΤΗ	SE
ΕΣ	475,9 a ^(*)	60,6	364,3 ab	35,9	405,1 ab	10,2	415,1 b	15,0
ΕΔ	469,9 a	9,9	350,9 ab	37,2	427,8 bc	16,3	416,2 b	15,7
ΥΣ	432,0 a	40,7	332,8 ab	14,4	350,4 a	4,2	371,8 ab	14,4
ΥΔ	460,1 a	40,8	310,1 a	41,5	379,5 ab	9,5	383,2 ab	26,7
ΕΒ	614,1 b	34,1	411,0 b	21,6	474,2 c	30,2	499,8 c	21,5
ΥΒ	363,4 a	75,5	324,1 ab	43,1	371,1 ab	15,2	352,9 a	29,9
ΑΣ	426,6 a	20,9	296,3 a	27,7	352,6 a	31,8	358,5 ab	22,7
ΑΤ	391,5 a	4,3	311,1 a	25,9	365,5 a	19,7	356,1 ab	15,9

(*) Εγγραφές που περιέχουν ίδια γράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά. SE: Τυπικό σφάλμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3. Τιμές αμινο-αζώτου όπως μετρήθηκαν στα δείγματα κάθε μεταχείρισης

Μεταχείριση	Συγκέντρωση a-N (mg / 100 g ζάχαρης)							
	2003	SE	2004	SE	2005	SE	3 ΕΤΗ	SE
ΕΣ	328,4 b ^(*)	9,6	367,3 ab	1,9	315,2 a	56,6	337,0 a	18,7
ΕΔ	316,6 ab	19,5	388,9 ab	26,4	362,0 a	50,1	355,8 a	14,3
ΥΣ	276,2 ab	20,9	405,3 b	5,1	351,4 a	54,2	344,3 a	18,5
ΥΔ	279,9 ab	31,3	399,2 b	19,8	324,2 a	47,0	334,5 a	18,7
ΕΒ	313,6 ab	11,2	384,6 ab	15,9	342,9 a	57,7	347,0 a	24,7
ΥΒ	265,1 a	12,4	324,9 ab	90,4	288,3 a	82,2	292,8 a	53,9
ΑΣ	294,5 ab	23,5	245,3 a	108,0	253,9 a	99,9	264,6 a	66,9
ΑΤ	285,1 ab	15,8	396,4 ab	22,5	354,4 a	40,1	345,3 a	11,8

(*) Εγγραφές που περιέχουν ίδια γράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά. SE: Τυπικό σφάλμα

6.4. ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Η σχέση της παραγωγής με την κατανάλωση νερού αποτελεί ίσως το εγκυρότερο μέτρο αξιολόγησης των μεθόδων και των τεχνικών άρδευσης. Αυτή η σχέση εκφράζεται με την αποδοτικότητα χρήσης νερού (water use efficiency), WUE, η οποία δίδεται γενικώς από τον λόγο της τελικής απόδοσης της καλλιέργειας προς την ποσότητα νερού που καταναλώθηκε για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση.

Μολονότι το είδος της καλλιέργειας μαζί με την διαθέσιμη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την WUE, το νερό είναι το κρίσιμο και σημαντικό στοιχείο στην γεωργία. Το νερό είναι σημαντικό στην τροφοδοτούμενη από τη βροχή γεωργία, πολύ σημαντικό στην γεωργία ημίξηρων περιοχών και εξόχως σημαντικό στην αρδευόμενη γεωργία (Howell, 2000). Η WUE ορίζεται γενικώς ως (Viets, 1962):

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad [6:1]$$

όπου:

WUE = η αποδοτικότητα χρήσης νερού

Y = η παραγωγή της καλλιέργειας (το εμπορεύσιμο προϊόν),

W = το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή .

Η WUE μπορεί επίσης να υπολογισθεί στη βάση της παραγωγής σε ξηρή μάζα (Sinclair et al., 1984), αλλά συνήθως η παραγωγή εκφράζεται σε νωπή (εμπορεύσιμη) μάζα, με πρότυπη σε κάποιες περιπτώσεις περιεκτικότητα σε υγρασία.

Μολονότι με αυτόν τον όρο η WUE είναι χρήσιμη και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές αναλύσεις, δεν διαχωρίζει τον ρόλο της άρδευσης. Ο Boss (1980,1985) ανέπτυξε κάποιες εκφράσεις που μπορούν ίσως να περιγράψουν το ρόλο της άρδευσης στην WUE. Αυτές μπορούν να γραφούν ως συνολική αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE_{ET}) και αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (WUE_{IRR}), ως ακολούθως:

$$WUE_{ET} = \frac{Y}{ET_i} \quad [6:2]$$

$$WUE_{IRR} = \frac{Y}{I} \quad [6:3]$$

όπου:

WUE_{ET} = η συνολική αποδοτικότητα χρήσης νερού ($\text{kg στρ}^{-1} \text{mm}^{-1}$),

WUE_{IRR} = η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού ($\text{kg στρ}^{-1} \text{mm}^{-1}$),

Y = η μάζα του παραγόμενου προϊόντος (kg στρ⁻¹),

ET_i = η υδατοκατανάλωση (mm),

I = το νερό που εφαρμόστηκε με την άρδευση (mm).

Η υδατοκατανάλωση της περιόδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο (James, 1988):

$$ET_i = I + P + SFI + LI + CR - LO - RO - DP + \Delta S \quad [6:4]$$

όπου:

I = η άρδευση (mm),

P = η βροχόπτωση (mm),

SFI = η οριζόντια επιφανειακή εισροή προς το ριζόστρωμα (mm),

LI = η οριζόντια υποεπιφανειακή ροή προς το ριζόστρωμα (mm),

CR = η τριχοειδής ανύψωση από αβαθή υπόγειο ορίζοντα (mm),

LO = η οριζόντια υποεπιφανειακή εκροή από το ριζόστρωμα (mm),

RO = η επιφανειακή απορροή (mm),

DP = η βαθιά διήθηση (mm),

ΔS = η διαφορά της υγρασίας του εδάφους (mm).

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, με εξαίρεση τις συνθήκες ισχυρών κλίσεων, οι παράγοντες SFI, LI και LO μπορούν να αγνοηθούν. Επίσης, επειδή η απορροή και η βαθιά διήθηση μπορεί να προέρχονται τόσο από την βροχή όσο και από την άρδευση, η Εξίσωση 6:4 μπορεί να γραφεί σε μια απλούστερη μορφή:

$$ET = I + P_e - RO_{IR} - DP_{IR} + \Delta S \quad [6:5]$$

όπου:

P_e = η ωφέλιμη βροχόπτωση (mm),

RO_{IR} = η επιφανειακή απορροή που προκαλείται από την άρδευση (mm),

DP_{IR} = η βαθιά διήθηση που προκαλείται από την άρδευση (mm).

Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας ή η αποθηκευμένη υγρασία στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, ΔS , δίδεται από την σχέση:

$$\Delta S = Z_r (\theta_f - \theta_i) \quad [6:6]$$

όπου:

Z_r = το βάθος του ριζοστρώματος (mm),

θ_f = η κατ' όγκο εδαφική υγρασία στο τέλος (συγκομιδή) της καλλιεργητικής περιόδου (-),

θ_i = η κατ' όγκο εδαφική υγρασία κατά την έναρξη (σπορά) της καλλιεργητικής περιόδου (-).

Η εξίσωση εφαρμόζεται με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει υπόγεια στάθμη σε βάθος που να μπορεί να τροφοδοτήσει το ριζόστρωμα με τριχοειδή ανύψωση κι ότι δεν συμβαίνει διήθηση του νερού σε βάθος μεγαλύτερο από το βάθος του ριζοστρώματος.

Η ποσότητα του νερού άρδευσης ήταν αυτή που καταγράφηκε από τα υδρόμετρα, διαιρεμένη με την επιφάνεια που εξυπηρετούσε κάθε υδρόμετρο.

Στα ζαχαρότευτλα η αποδοτικότητα του νερού αναφέρεται στην παραγωγή ριζών και στην παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα. Η τελευταία προκύπτει από την παραγωγή ριζών και τον σακχαρικό τίτλο που μετρήθηκε από την Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης.

Σε κάθε περίπτωση, υπολογίστηκαν και καταγράφονται δύο τιμές αποδοτικότητας χρήσης νερού. Η μια τιμή, WUE_{IRR} , υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη μόνον το νερό άρδευσης και η δεύτερη, WUE_{TOT} , αποτελεί την συνολική αποδοτικότητα, που υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη και την βροχόπτωση καθώς και την αποθηκευμένη στο έδαφος υγρασία, στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου.

Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται κατά έτος πειραματισμού η αποδοτικότητα του καταναλισκόμενου νερού εκφρασμένη σε χιλιόγραμμα παραγωγής ανά χιλιοστόμετρο (= κυβικό μέτρο ανά στρέμμα) νερού σε σχέση με την παραγωγή ριζών, ενώ ο Πίνακας 6.5 δίδει την αποδοτικότητα σε σχέση με την παραγωγή ζάχαρης.

Έτσι η αποδοτικότητα του αρδευτικού νερού ως προς το βάρος των ριζών που συγκομίστηκαν παρουσιάζεται υψηλότερη στην υπόγεια διακοπτόμενη άρδευση (ΥΔ), με μέση τιμή αποδοτικότητας νερού άρδευσης για τα τρία έτη $18,1 \text{ kg mm}^{-1}$ και συνολικής αποδοτικότητας $13,5 \text{ kg mm}^{-1}$.

Ακολουθούν, η μεταχείριση συνεχούς εφαρμογής αέρα (ΑΣ) και υπόγειας συνεχούς άρδευσης (ΥΣ) φθάνοντας σχεδόν στα ίδια επίπεδα αποδοτικότητας νερού άρδευσης (τρία έτη) και συνολικής αποδοτικότητας (δύο έτη). Η μέση τιμή WUE_{IRR} διαμορφώθηκε για την πρώτη σε $16,4$ και για τη δεύτερη σε $16,2 \text{ kg mm}^{-1}$. Ενώ οι τιμές τους για την WUE_{TOT} έφθασαν τα $12,13$ και $12,11 \text{ kg mm}^{-1}$, αντιστοίχως.

Η υπόγεια διακοπτόμενη στάγδην άρδευση (ΥΔ) παρουσίασε επίσης την υψηλότερη αποδοτικότητα για την παραγωγή ζάχαρης, τόσο ως προς την αποδοτικότητα νερού άρδευσης που έφθασε μια μέση τιμή για τα τρία έτη $2,82 \text{ kg/mm}$ όσο και ως προς τη συνολική αποδοτικότητα που έφθασε στα $2,11 \text{ kg/mm}$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4. Αποδοτικότητα της χρήσης νερού ως προς την παραγωγή ριζών

Άρδευση	WUE _{TOT}				WUE _{IRR}			
	2003	2004	2005	3 ΕΤΗ	2003	2004	2005	3 ΕΤΗ
ΕΣ	8,6	9,6	10,9	9,7	12,3	13,1	14,5	13,3
ΕΔ	10,7	10,2	12,3	11,1	15,2	14,1	16,2	15,2
ΥΣ	12,5	11,0	12,8	12,1	16,4	15,0	17,3	16,2
ΥΔ	13,5	12,4	14,8	13,5	17,5	17,0	19,7	18,1
ΕΒ	-	9,6	11,3	10,5	14,8	14,2	14,9	14,6
ΥΒ	-	11,7	11,1	11,4	14,3	14,9	14,5	14,6
ΑΣ	-	10,8	13,5	12,1	16,0	15,1	18,0	16,4
ΑΤ	-	10,3	11,5	10,9	15,7	14,3	15,1	15,1

(-) Δεν σημειώνονται τιμές WUE διότι δεν μετρήθηκε η υγρασία στις μεταχειρίσεις αυτές κατά το 2003.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5. Αποδοτικότητα της χρήσης νερού ως προς την παραγωγή ζάχαρης

Άρδευση	WUE _{TOT}				WUE _{IRR}			
	2003	2004	2005	3 ΕΤΗ	2003	2004	2005	3 ΕΤΗ
ΕΣ	1,36	1,55	1,56	1,49	1,97	2,13	2,07	2,06
ΕΔ	1,72	1,71	1,79	1,74	2,44	2,35	2,36	2,38
ΥΣ	2,00	1,79	1,88	1,89	2,61	2,44	2,54	2,53
ΥΔ	2,14	2,01	2,19	2,11	2,78	2,77	2,92	2,82
ΕΒ	-	1,55	1,62	1,59	2,14	2,28	2,14	2,18
ΥΒ	-	1,89	1,54	1,71	2,28	2,40	2,02	2,23
ΑΣ	-	1,73	1,91	1,82	2,54	2,42	2,55	2,50
ΑΤ	-	1,67	1,59	1,63	2,45	2,32	2,09	2,29

(-) Δεν σημειώνονται τιμές WUE διότι δεν μετρήθηκε η υγρασία στις μεταχειρίσεις αυτές κατά το 2003.

6.5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ανάπτυξη της καλλιέργειας

Ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI) κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως σε σχέση με τις επιφανειακές. Και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους, τα ζαχαρότευτλα παρουσιάζουν τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης έως περίπου και την 60ή ημέρα από την σπορά και κατόπιν παρατηρείται η προς τα κάτω διαφοροποίηση των υπόγειων μεταχειρίσεων. Πρόκειται για την χρονική περίοδο που αρχίζει λίγο μετά την έναρξη των αρδεύσεων μεταχείρισης. Φαίνεται λοιπόν πως η έλλειψη νερού σε τμήμα του ήδη ανεπτυγμένου ριζικού συστήματος της καλλιέργειας υπό την ΥΣΑ, επηρέασε τον LAI.

Ο LAI συνδέεται άμεσα με την διαθέσιμη ποσότητα αζώτου στην καλλιέργεια. Η εδαφική υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην διαλυτοποίηση και συνεπώς στην διαθεσιμότητα του αζώτου. Το γεγονός, ότι στην υπόγεια στάγδην άρδευση το επιφανειακό στρώμα του εδάφους διατηρείται ξηρό, πιθανόν, εξηγεί τη μειωμένη ανάπτυξη φυλλώματος σε σχέση με την επιφανειακή, καθώς το άζωτο στην επιφανειακή στρώση, προφανώς, δεν κατέστη διαθέσιμο για τα φυτά κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης.

Προϊόντος του χρόνου, ο LAI φαίνεται να επανακάμπτει στις υπόγειες μεταχειρίσεις και να φθάνει σχεδόν στα επίπεδα των επιφανειακών, ένα μήνα περίπου πριν τη συγκομιδή. Αυτό οφείλεται πιθανόν στην αποκατάσταση της διαδικασίας ευχερούς πρόσληψης νερού από τα φυτά μέσω της ανάπτυξης βαθύτερου ριζικού συστήματος και την πρόσληψη νερού από βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι την «απώλεια» πρόσληψης από το επιφανειακό μη διαβρεχόμενο πλήρως στρώμα.

Αν και ο LAI σχετίζεται θετικά με την φωτοσύνθεση και συνεπώς με την ανάπτυξη της βιομάζας, το γεγονός ότι στα τεύτλα ο ζαχαρικός τίτλος είναι η παράμετρος που παίζει μεγαλύτερο ρόλο, έχοντας επιτευχθεί παράλληλα ένα ικανοποιητικό βάρος ριζών, δεν μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η επίτευξη μεγαλύτερου LAI θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή. Η μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να συντηρηθεί, οπότε αν μεγαλύτερο μέρος των προϊόντων της φωτοσύνθεσης μετακινηθεί προς το φύλλωμα, αυτό θα έχει ίσως αρνητική επίπτωση στον ζαχαρικό τίτλο των ριζών. Κύριος στόχος σε μια καλλιέργεια ζαχαρότευτλων είναι η μέγιστη δυνατή δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται άμεσα με τον LAI. Το 85-95% του προσπίπτοντος φωτός δεσμεύεται με LAI μόνο 3-4 (Scott and Jaggard, 1993), τιμές οι οποίες επιτεύχθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Το βάρος των φύλλων και των κορυφών στις αρδευόμενες υπογείως μεταχειρίσεις ήταν στις περισσότερες δειγματοληψίες χαμηλότερο από αυτό των επιφανειακών. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις διαφορές που βρέθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Το ποσοστό της μάζας των ριζών στη συνολική ξηρή μάζα δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Εμφανίζεται όμως μια μικρή υπεροχή των υπόγειων μεταχειρίσεων. Το τελικό αυτό ποσοστό (συγκομιδή) αυτό έφθασε το 79% στην μεταχείριση ΕΣ ενώ υπερέβη το 83% στη ΥΣ.

Απόδοση της καλλιέργειας

Κατά την αξιολόγηση του οφέλους της άρδευσης, κύριο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση των οικονομικών συνθετικών της παραγωγής, ήτοι των ριζών και ιδιαίτερος της ζάχαρης. Τα αποτελέσματα της στρεμματικής απόδοσης σε βάρος ριζών έδειξαν πως και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Η ΥΔ υπερέιχε και ακολούθησε η ΕΔ. Στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο (2003) η διακοπτόμενη υπόγεια άρδευση (ΥΔ) έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών χωρίς όμως σημαντική διαφορά.

Το 2004, η απόδοση της ΥΔ ήταν πάλι η υψηλότερη διαφέροντας στατιστικώς σημαντικά με τις μεταχειρίσεις που έδωσαν την μικρότερη παραγωγή σε βάρος ριζών, ήτοι των δύο μεταχειρίσεων εφαρμογής αέρα. Κατά την συγκομιδή του έτους 2005, η διαφοροποίηση της απόδοσης μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν εντονότερη παρουσιάζοντας στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των σε αρκετές περιπτώσεις. Οι δύο μεταχειρίσεις διακοπτόμενης άρδευσης υπερέιχαν και πάλι έναντι των υπολοίπων. Μεταξύ των μεταχειρίσεων ΕΒ και ΕΣ υπάρχει σχετική υπεροχή της ΕΒ, πλην όμως όχι στατιστικώς σημαντική. Στην περίπτωση των μεταχειρίσεων εφαρμογής αέρα, η συνεχής εφαρμογή (ΑΣ), έδωσε μεγαλύτερη απόδοση και τα τρία έτη, παρουσιάζοντας στατιστικώς σημαντική διαφορά μόνο κατά το τρίτο έτος, όπου η ΑΣ έφθασε σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τα προηγούμενα έτη.

Η μεταχείριση ΥΒ φαίνεται να υστερεί σε σχέση με τις υπόλοιπες, αφού η μέση απόδοσή της για τα τρία έτη ήταν η χαμηλότερη. Οι πιθανές απώλειες νερού λόγω βαθιάς διήθησης, με αποτέλεσμα την μικρότερη ποσότητα νερού διαθέσιμη για την καλλιέργεια, εξηγεί την μειωμένη απόδοση των ζαχαροτεύτλων στην μεταχείριση αυτή.

Η τελική απόδοση σε βάρος ριζών διαφοροποιείται σε σχέση με την ανάπτυξη

της καλλιέργειας σε κάθε μεταχείριση όπως αυτή εκτιμήθηκε με τη μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Αυτό εξηγείται διότι κατά την διάρκεια του πρώτου μισού διαστήματος της βλαστικής περιόδου η αύξηση της ρίζας εξαρτάται από τον ΔΦΕ, ενώ δεν υπάρχει σχεδόν καμία σχέση μεταξύ του ΔΦΕ και του ποσοστού αύξησης της ρίζας στο μετέπειτα διάστημα (Scott and Jaggard, 1993).

Ποιοτικά χαρακτηριστικά παραγωγής

Η απόδοση σε ζάχαρη έδωσε ανάλογα αποτελέσματα με αυτά της απόδοσης σε βάρος ριζών αφού η περιεκτικότητα σε ζάχαρη δεν παρουσίασε ιδιαίτερη διαφοροποίηση. Έτσι, οι αρδευόμενες με διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις ΥΔ και ΕΔ έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα και τα τρία έτη.

Η συγκέντρωση ζάχαρης σε καλά αρδευόμενα ζαχαρότευτλα αυξάνεται σταθερά κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, φθάνοντας σε μια μέγιστη τιμή 15-18% (g ζάχαρης ανά 100 g νωπής ρίζας) αρκετά πριν τη συγκομιδή. Σε καταπονημένες καλλιέργειες, η συγκέντρωση ζάχαρης αυξάνεται ταχύτερα και, κάτω από μεγάλης διάρκειας καταπόνηση, μπορεί να είναι 5% υψηλότερη σε σχέση με μη καταπονημένα φυτά (Hang and Miller, 1986a). Όμως, πειράματα με ένα ευρύ φάσμα μεταχειρίσεων άρδευσης έδειξαν μικρή επίδραση στη συγκέντρωση ζάχαρης στην τελική συγκομιδή (Ehlig and LeMert, 1979, Winter, 1988). Αυτό οφείλεται στα αυξανόμενα ποσά μελασσογόνων στις ρίζες των καταπονημένων φυτών που επιδρούν μειώνοντας την μετρούμενη συγκέντρωση ζάχαρης σε σχέση με αυτήν των μη καταπονημένων, κατά τη συγκομιδή. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας είναι οι βροχοπτώσεις του τελικού σταδίου που τείνουν να επανυδατώσουν τις ρίζες των καταπονημένων τεύτλων, χαμηλώνοντας κατά συνέπεια τη συγκέντρωση ζάχαρης (Vukon, 1977).

Οι Loomis and Worker (1963) ανέφεραν αυξημένη συγκέντρωση ζάχαρης υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης. Οι Ehlig and LeMert (1979) διαπίστωσαν πως ούτε η συγκέντρωση ζάχαρης, ούτε η παραγωγή επηρεάστηκαν από το νερό που εφαρμόστηκε συστηματικά 11% επάνω και 23% κάτω από την ΕΤ. Οι Miller and Hang (1980) συμπέραναν πως η παραγωγή ζάχαρης δεν επηρεάστηκε από την μειωμένη καθημερινή άρδευση στα επίπεδα του 35% έως 50% της εξατμισοδιαπνοής. Αντιθέτως, οι ίδιοι ερευνητές (Hang and Miller, 1986a,b) αναφέρουν αυξημένη συγκέντρωση ζάχαρης με περιορισμένη άρδευση. Επιπλέον, διαπίστωσαν αύξηση της ξηρής μάζας με εφαρμογή έως και του 85% της ΕΤ. Ο Winter (1988) αναφέρει πως το ποσοστό

ζάχαρης στην ρίζα του τεύτλου δεν επηρεάσθηκε από ένα μεγάλο εύρος συνθηκών υδατικής καταπόνησης. Οι Howell et al. (1987) διαπίστωσαν μια αύξηση του ποσοστού ζάχαρης και κατά συνέπεια της παραγωγής ζάχαρης λόγω της πρώιμης παύσης των αρδεύσεων. Στην ίδια μελέτη, αναφέρεται πως η μικρότερη συχνότητα άρδευσης δεν μείωσε σημαντικά την παραγωγή ζάχαρης. Οι Carter et al. (1980) συζητούν την υδατική καταπόνηση στο τέλος της βλαστικής περιόδου παρά την επίδραση της ΕΤ στην παραγωγή. Οι Davidoff and Hanks (1989) διαπίστωσαν πως η παραγωγή ζάχαρης σχετίζεται περισσότερο με την παραγωγή σε ρίζες και πολύ λιγότερο με το ποσοστό ζάχαρης.

Η υπεροχή της διακοπτόμενης εφαρμογής είναι σαφής και στο υπολογισμένο οικονομικό όφελος, ενώ δεν υπάρχει συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ των υπολοίπων μεταχειρίσεων, οι οποίες ακολουθούν την τάση που παρατηρήθηκε στην παραγωγή ριζών, εκτός από την ΕΒ, που λόγω μικρότερου ζαχαρικού τίτλου παρουσιάζει μειωμένη απόδοση σε ζάχαρη καθώς και πρόσοδο τα δύο πρώτα έτη.

Όσον αφορά στα μελασσογόνα συστατικά, η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Κ παρατηρείται στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως, χωρίς σημαντική διαφορά. Στην περιεκτικότητα του Na στις ρίζες των τεύτλων δεν σημειώνονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι στην μεταχείριση επιφανειακής άρδευσης με χαμηλή πίεση (ΕΒ), η συγκέντρωση του Na είναι η υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις και στα τρία έτη πειραματισμού. Σημαντική διαφοροποίηση δεν παρατηρήθηκε επίσης και στα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του αμινο-N στη ρίζα του ζαχαρότευτλου μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Σύμφωνα με τους Milford et al., (2000), οι εμπορικά αποδεκτές συγκεντρώσεις Κ στα ζαχαρότευτλα είναι 700–1000 mg Κ ανά 100 g ζάχαρης. Συγκεντρώσεις πάνω από τα όρια αυτά μειώνουν το ποσό της ζάχαρης που κρυσταλλώνεται από το χυμό, αφού η επίδραση του Κ είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των άλλων μελασσογόνων συστατικών. Υψηλές συγκεντρώσεις του Κ στις ρίζες περιορίζουν το ποσοστό της ζαχαρόζης που μπορεί να εξαχθεί ως κρυσταλλική ζάχαρη κατά την βιομηχανική διαδικασία. Έτσι, ο Κ έχει μεγαλύτερη επίδραση από ότι το Na και το α-N (Hurvey and Dutton, 1993).

Ο Barbanti (1994) καθόρισε τα όρια συγκέντρωσης του Na στη Βόρεια Ιταλία σε 140 mg ανά 100 g ζάχαρης. Σύμφωνα με τους Palmer and Casburn (1985), τα αποδεκτά όρια του α-αμινο Ν στα τεύτλα σε ανόργανα εδάφη είναι 150 mg και σε οργανικά 200 mg ανά 100 g ζάχαρης. Για τις ελληνικές συνθήκες οι Tsialtas and Maslaris (2004), αναφέρουν συγκεντρώσεις μελασσογόνων στα τεύτλα σε πολύ υψηλότερα

επίπεδα από τα αποδεκτά όρια που αναφέρθηκαν. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.

Αποδοτικότητα χρήσης νερού

Οι τεχνικές άρδευσης με υπόγεια σταγόνα παρουσιάζονται αποδοτικότερες από τις επιφανειακές. Η υπόγεια διακοπτόμενη (ΥΔ) αξιολογείται ως η πλέον αποδοτική τεχνική που εφαρμόστηκε, αφού παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές τόσο σε αποδοτικότητα νερού άρδευσης όσο και σε συνολική αποδοτικότητα και για τα τρία έτη πειραματισμού. Αντιθέτως, η επιφανειακή συνεχής (συμβατική) άρδευση (ΕΣ), αξιολογείται ως η λιγότερο αποδοτική αφού και για τις τρεις περιόδους παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές τόσο σε αποδοτικότητα νερού άρδευσης όσο και σε συνολική αποδοτικότητα.

Τα επίπεδα της αποδοτικότητας χρήσης νερού που επιτεύχθηκαν με την ΥΣΑ παρουσιάζονται υψηλά αν και δεν μπορούν να αξιολογηθούν απόλυτα αφού δεν υπάρχουν δημοσιευμένες πληροφορίες αποδοτικότητας χρήσης νερού σε ζαχαρότευτλα αρδευόμενα με υπόγεια στάγδην άρδευση στην διεθνή βιβλιογραφία.

Οι Sepaskhah and Kamgar-Haghighi (1997) αναφέρουν τιμές αποδοτικότητας χρήσης νερού για παραγωγή ριζών που κυμαίνονται από 1,91 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ για εφαρμογή 2248 mm νερού και 5,21 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ για εφαρμογή 803 mm νερού σε καλλιέργεια αρδευόμενη με αυλάκια. Οι Sharmasarkar et al. (2001) σε πειράματα άρδευσης τεύτλων με επιφανειακή στάγδην κατέγραψαν αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού για παραγωγή ριζών που κυμάνθηκε από 9,6 έως 10,6 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ με την μεγαλύτερη WUE_{IRR} να αποδίδεται στην άρδευση με την μεγαλύτερη συχνότητα.

Οι Fabeiro et al. (2003) σε εργασία τους, δημοσιεύουν τα αποτελέσματα πειράματος ελλειμματικής άρδευσης ζαχαροτεύτλων με επιφανειακή στάγδην και αναφέρουν αποδοτικότητες χρήσης νερού από 12 έως 18 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ για κατανάλωση 896 και 690 mm νερού, αντιστοίχως. Δημοσιευμένα αποτελέσματα αναφέρουν αποδοτικότητες χρήσης νερού για παραγωγή ζάχαρης από 0,7 έως 1,6 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ σε ζαχαρότευτλα σπαρμένα την άνοιξη (Cassel and Bauer, 1976), από 1,1 έως 2,5 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ σε περιοχές με υδατοκατανάλωση 600-900 mm (Dunham, 1993) ενώ οι Ehlig and LeMert (1979) αναφέρουν τιμές από 1,4 έως 2,0 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹, για τις Η.Π.Α. και οι Rinaldi and Vonella (2004) δίδουν WUE για την ζάχαρη 1,23 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹, για περιοχή της Νότιας Ιταλίας. Οι Ayars et al. (1990) αναφέρουν τιμές που φθάνουν το 1,55 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ για τεύτλα αρδευόμενα με μη και 1,49 Kg στρ⁻¹ mm⁻¹ για αρδευόμενα με αλατούχο νερό.

Επίδραση των τεχνικών εφαρμογής του νερού στις υγρασιακές συνθήκες του εδάφους

7.1. ΕΣΑΓΩΓΗ

Η αποδοτική χρήση του νερού (και των χημικών) από τις γεωργικές καλλιέργειες είναι σημαντική τόσο από οικονομική, όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Η υπεράρδευση έχει ως αποτέλεσμα απώλεια νερού και χημικών λόγω βαθιάς διήθησης, προκαλεί μόλυνση του υπόγειου νερού και μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών. Η υποάρδευση αντιθέτως, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικρού διαβρεχόμενου εδαφικού όγκου που δεν μπορεί να παρέχει επαρκές νερό στα φυτά (Khan et al., 1996).

Μέσω της στάγδην άρδευσης είναι εφικτή η διαχείριση της υγρασίας και των χημικών. Η γνώση του σχήματος του διαβρεχόμενου εδαφικού όγκου και της κατανομής της υγρασίας μέσα σε αυτόν, είναι ιδιαίτερος σημαντική για την διαχείριση των συστημάτων στάγδην άρδευσης. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας ανά μονάδα εφαρμοζόμενου νερού, αυτό πρέπει να παρέχεται εκεί όπου οι ρίζες των φυτών μπορούν να το προσλαμβάνουν με ευκολία.

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων υγρασίας στο έδαφος και αξιολογείται η επίδραση των διαφόρων τεχνικών εφαρμογής του νερού στην κατανομή αυτής.

7.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Τα ζαχαρότευτλα έχουν ένα βαθύ ριζικό σύστημα που μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά το νερό από βάθος περίπου 100 cm, εφόσον δεν υπάρχουν αδιαπέρατοι οριζόντες στην εδαφική κατατομή (Dunham, 1993). Συνεπώς, η διατήρηση της υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα μέχρι αυτό το βάθος είναι σημαντικό ζήτημα τόσο για την ανάπτυξη της καλλιέργειας όσο και για την αποφυγή απωλειών.

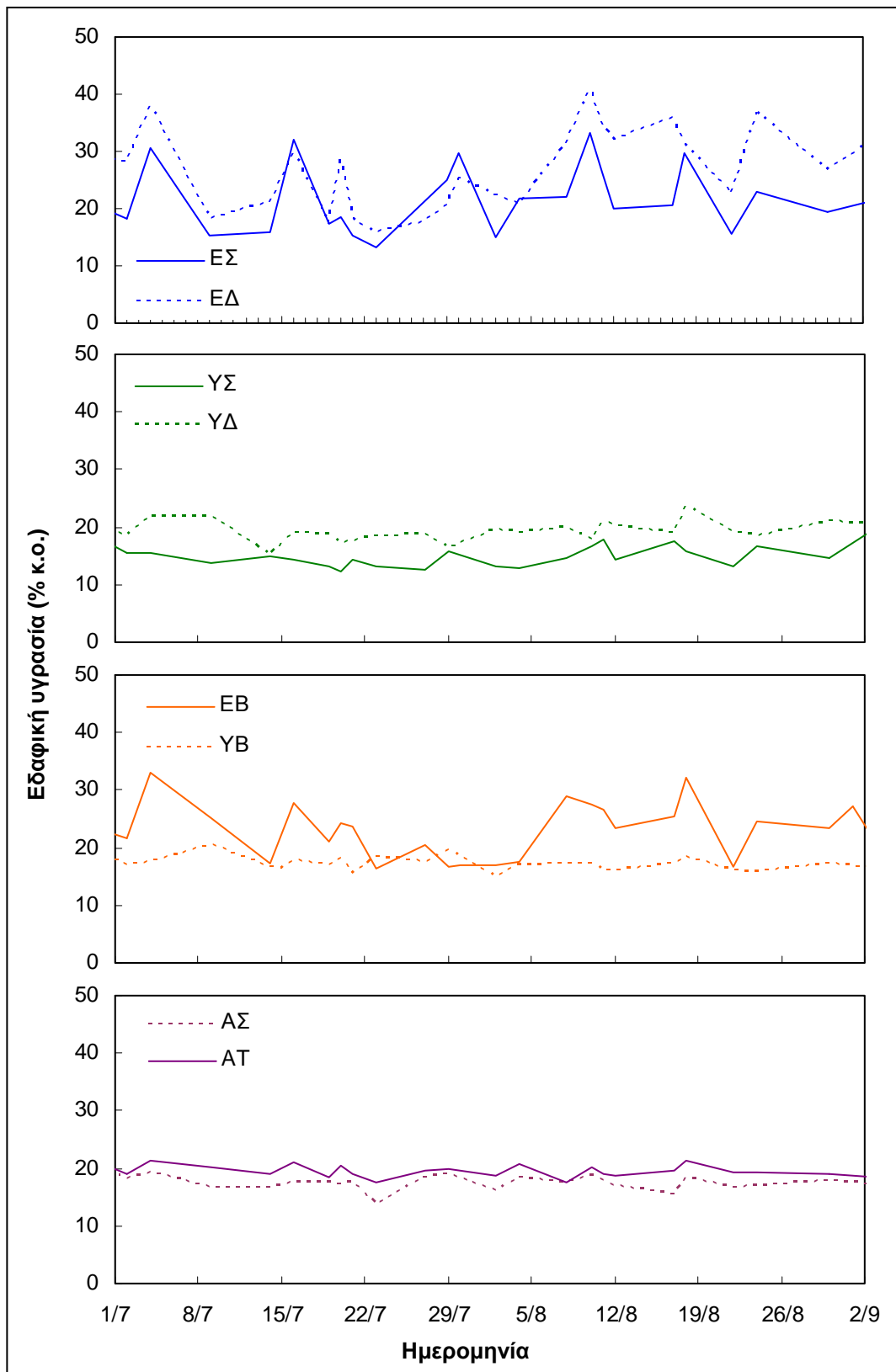
7.2.1. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στην εδαφική κατατομή για κάθε μεταχείριση δίδεται στις Εικόνες 7.1α έως 7.1ε που ακολουθούν. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην αρδευτική περίοδο του έτους 2004. Ανάλογη διακύμανση καταγράφεται και στα τρία έτη.

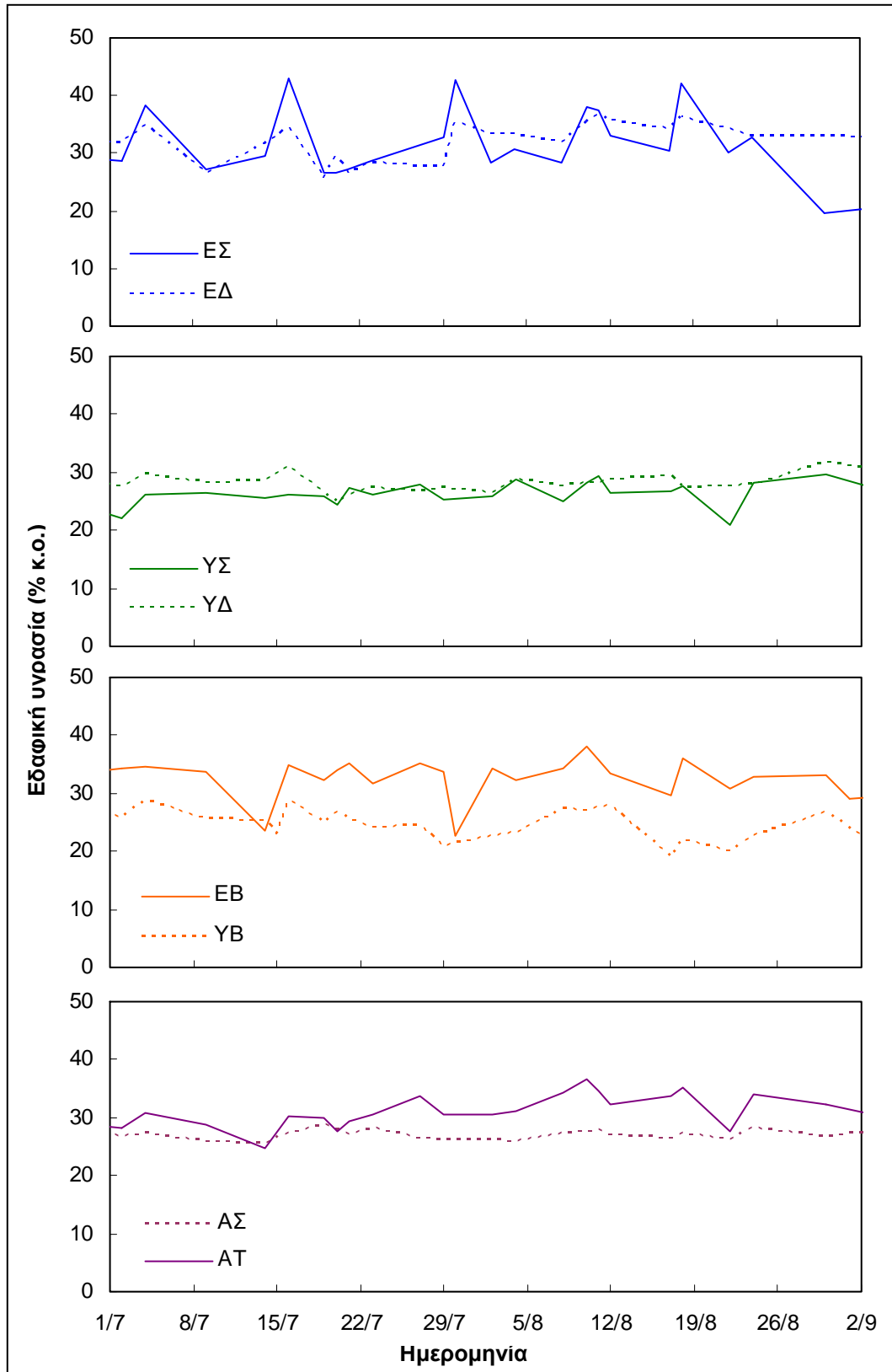
Στο επιφανειακό στρώμα, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ ΕΣ και ΕΔ. Αντιθέτως, η ΥΔ κυμάνθηκε σε ελαφρώς πιο μεγάλο επίπεδο από την ΥΣ, ενώ δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά η υγρασία στις μεταχειρίσεις εφαρμογής αέρα. Στο βάθος αυτό, παρατηρείται χαμηλή υγρασία στις περιπτώσεις των υπόγειων μεταχειρίσεων, αφού δεν διαβρεχόταν το επιφανειακό στρώμα. Στην υπόγεια εφαρμογή με χαμηλή πίεση (ΥΒ), διαπιστώνεται η μικρότερη διύγρυνση του επιφανειακού στρώματος, αφού η υγρασία κυμάνθηκε στα επίπεδα του σημείου μόνιμης μάρανσης.

Στο βάθος 15-30 cm, σε όλες τις περιπτώσεις, η υγρασία διατηρήθηκε κοντά στην υδατοϊκανότητα. Αυξημένες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες παρουσίασε η ΕΒ. Στο βάθος των 30-60 cm, η ΕΔ διατηρήθηκε σταθερά σε υψηλότερα επίπεδα από την ΕΣ. Η ίδια τάση παρατηρείται και στις υπόγειες εφαρμογές συνεχούς και διακοπτόμενης άρδευσης. Σε αυτό το βάθος, παρατηρήθηκε αυξημένη υγρασία στην υπόγεια άρδευση με χαμηλή παροχή (ΥΒ), σε σχέση με το βάθος των 0-30 cm. Στις μεταχειρίσεις εφαρμογής αέρα, διατηρείται η τάση που παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα δύο βάθη, με την ΑΤ δηλαδή να κυμαίνεται συστηματικά σε μεγαλύτερα επίπεδα εδαφικής υγρασίας από την ΑΣ.

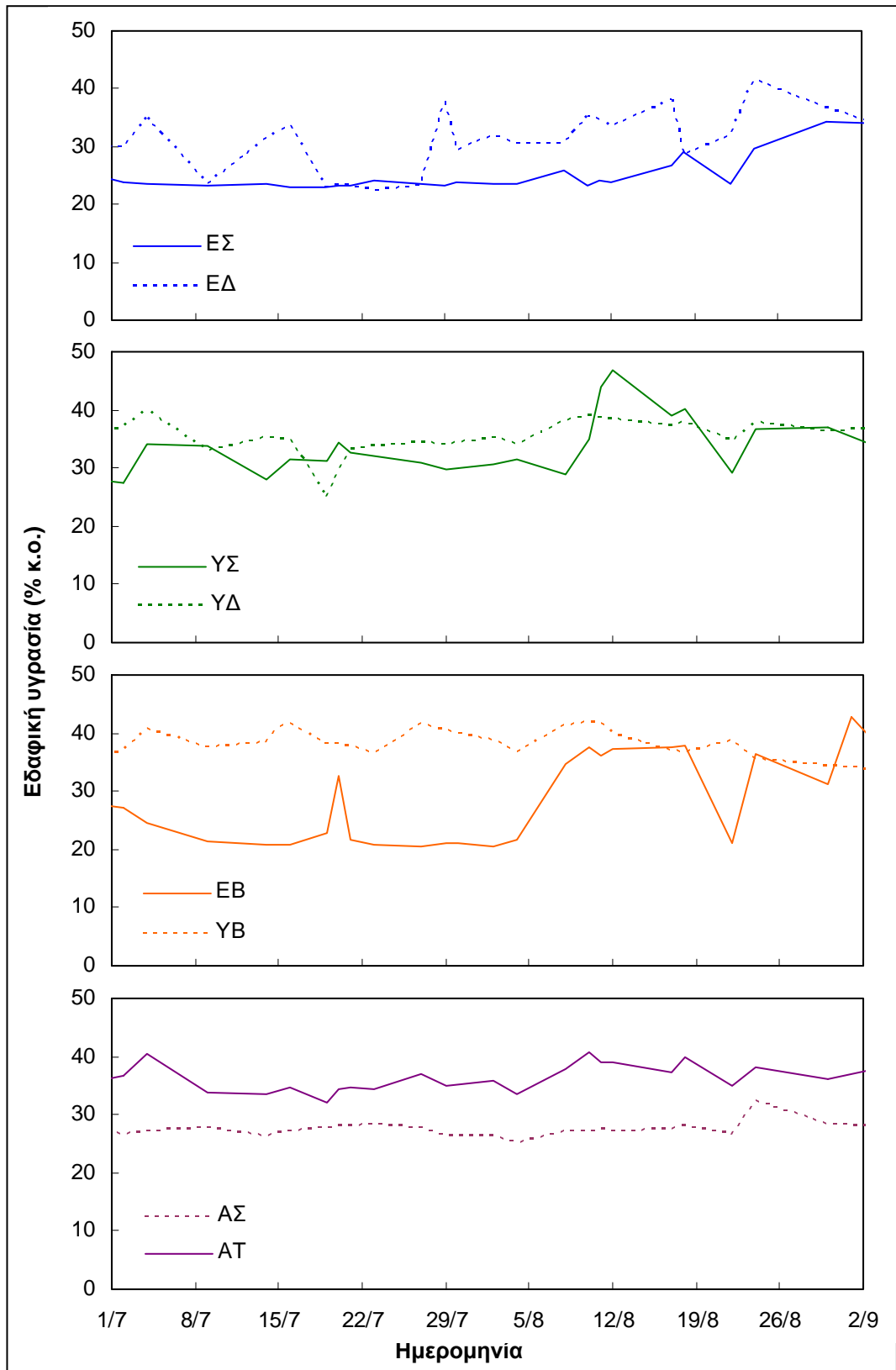
Στο βάθος των 60-90 cm, παρατηρείται υψηλότερη υγρασία στις υπόγειες μεταχειρίσεις, χωρίς να υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Τέλος, στην τελευταία στρώση, αυτή των 90-120 cm, φαίνεται η χαμηλότερη υγρασία των επιφανειακών μεταχειρίσεων σε σχέση με τις υπόγειες, όπου οι τιμές της κυμάνθηκαν σε υψηλά επίπεδα.



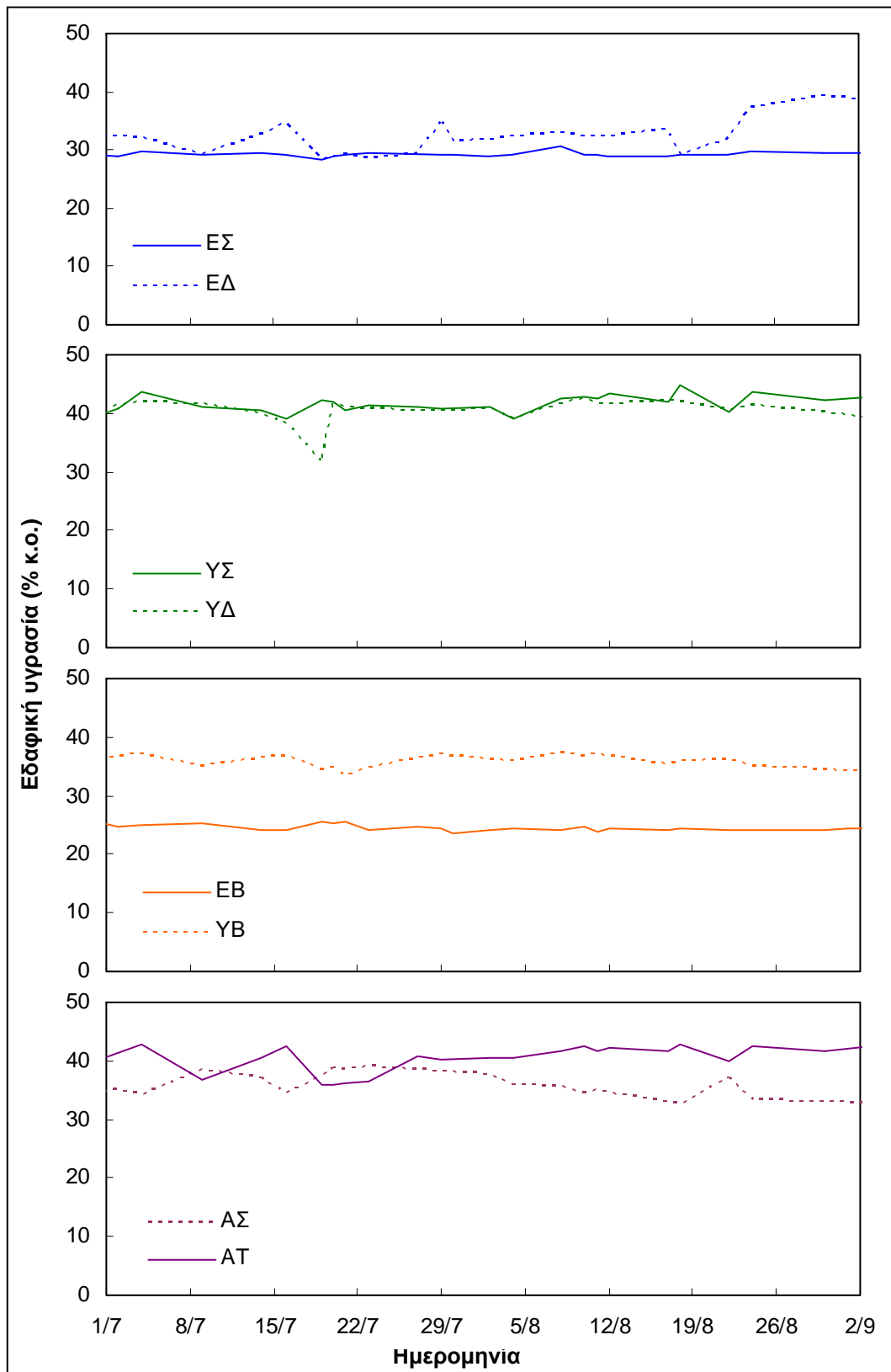
Εικόνα 7.1α: Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 0-15 cm σε κάθε μεταχείριση.



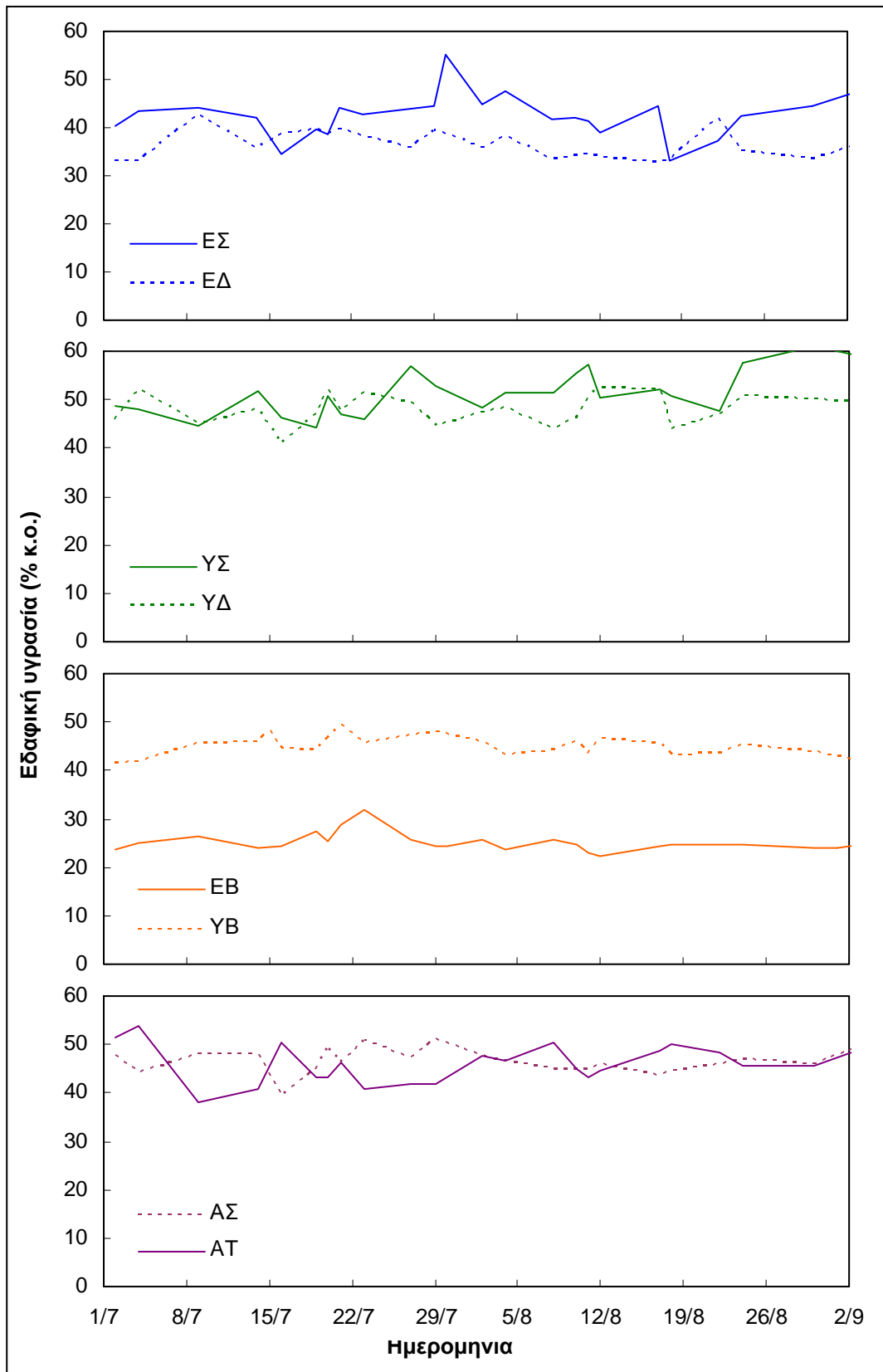
Εικόνα 7.1β: Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 15-30 cm σε κάθε μεταχείριση.



Εικόνα 7.1γ: Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 30-60 cm σε κάθε μεταχείριση.



Εικόνα 7.1δ: Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 60-90 cm σε κάθε μεταχείριση.



Εικόνα 7.1ε: Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε βάθος 90-120 cm σε κάθε μεταχείριση.

7.2.2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΤΟΜΗ

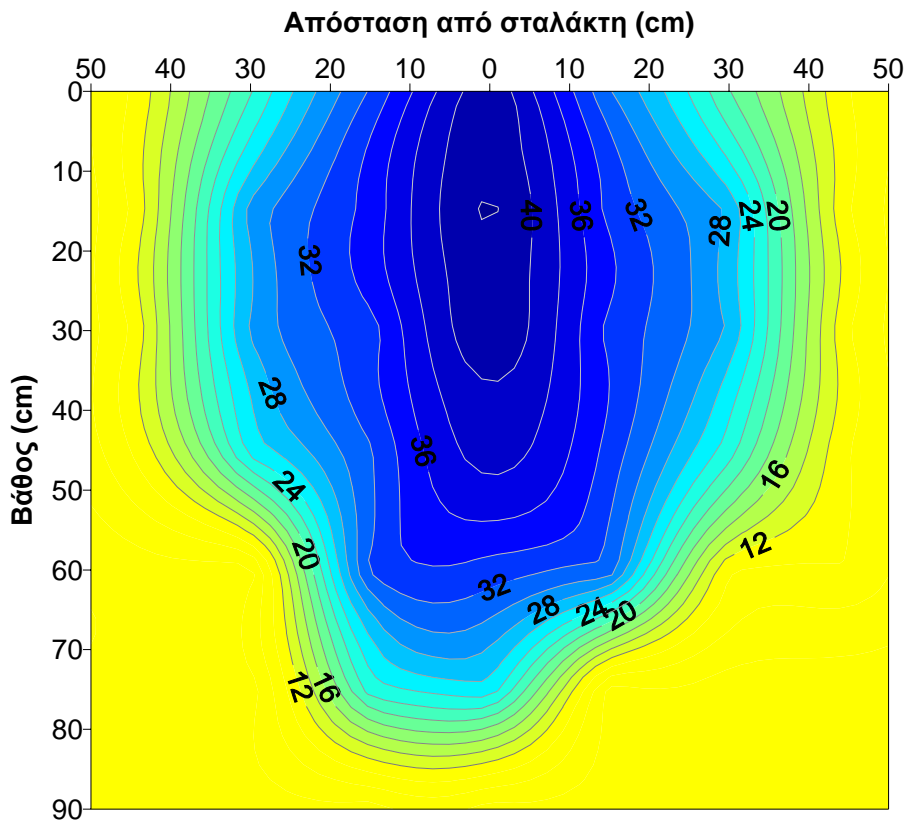
Οι Εικόνες 7.2α – 7.2η παρουσιάζουν την κατανομή της εδαφικής υγρασίας όπως μετρήθηκε σε κάθε μεταχείριση μετά την εφαρμογή της άρδευσης. Η κατανομή που παρουσιάζεται, είναι αντιπροσωπευτική των τριών σειρών μετρήσεων που διενεργήθηκαν. Η υγρασία μετρήθηκε με τη διάταξη Trime-FM (TDR) και εκφράζεται σε ποσοστό κατ' όγκο.

Από την κλιμάκωση της χρωματικής διαβάθμισης αλλά και από τις ισοϋψείς γραμμές της υγρασίας που κατασκευάσθηκαν, δίδεται μια εικόνα της κατανομής του νερού σε κάθε μεταχείριση.

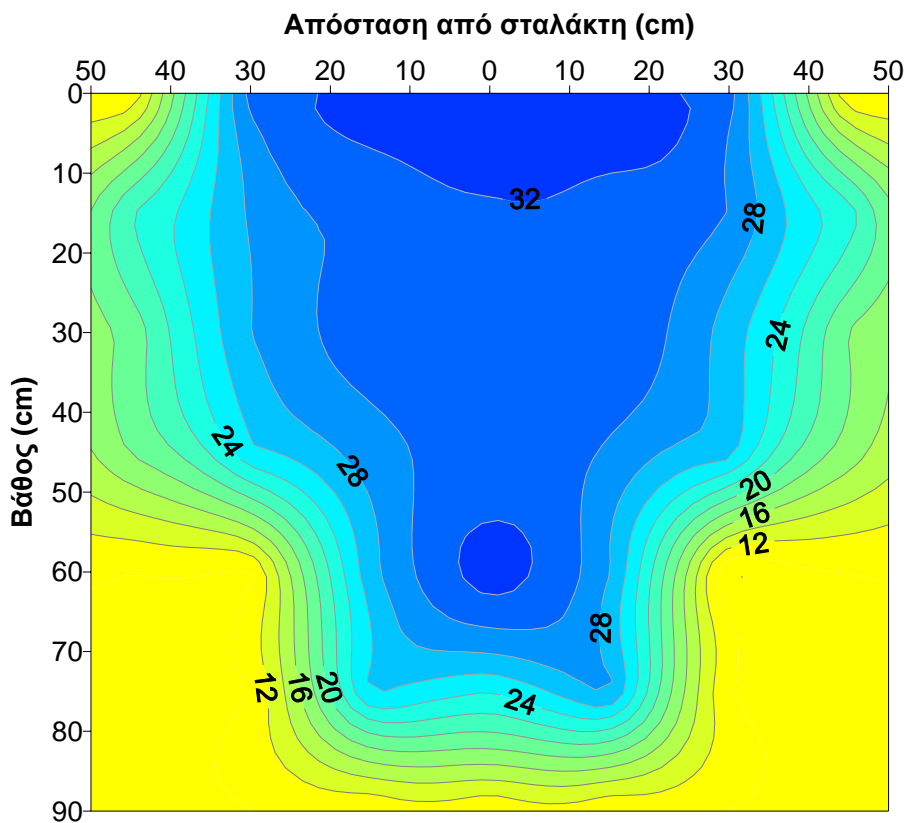
Η εφαρμογή της διακοπτόμενης άρδευσης είχε ως αποτέλεσμα την περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας, τόσο στο επιφανειακό (ΕΔ) όσο και στο υπόγειο (ΥΔ) σύστημα σε σχέση με την συνεχή (συμβατική εφαρμογή).

Στις εφαρμογές άρδευσης με χαμηλή παροχή, παρατηρείται καλύτερη κατανομή της ΕΒ σε σχέση με την συμβατική ΕΣ αλλά στην περίπτωση της ΥΒ παρατηρείται η χειρότερη ομοιομορφία αφού οι τιμές της υγρασίας έφθασαν στο επίπεδο 50-60%.

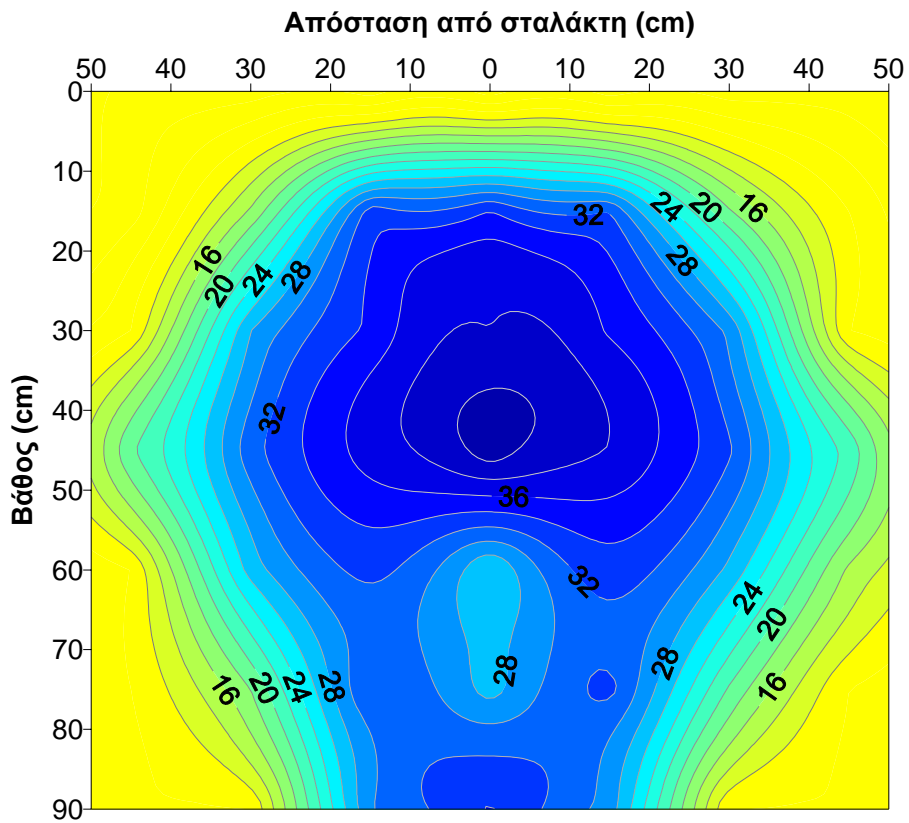
Η συνεχής εφαρμογή αέρα (ΑΣ) φαίνεται να είχε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης (ΑΤ) όπου η παροχή αέρα φαίνεται να μείωσε την υγρασία πάνω από τον σταλάκτη, αλλά κάτω από το επίπεδο αυτού, η υγρασία κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα.



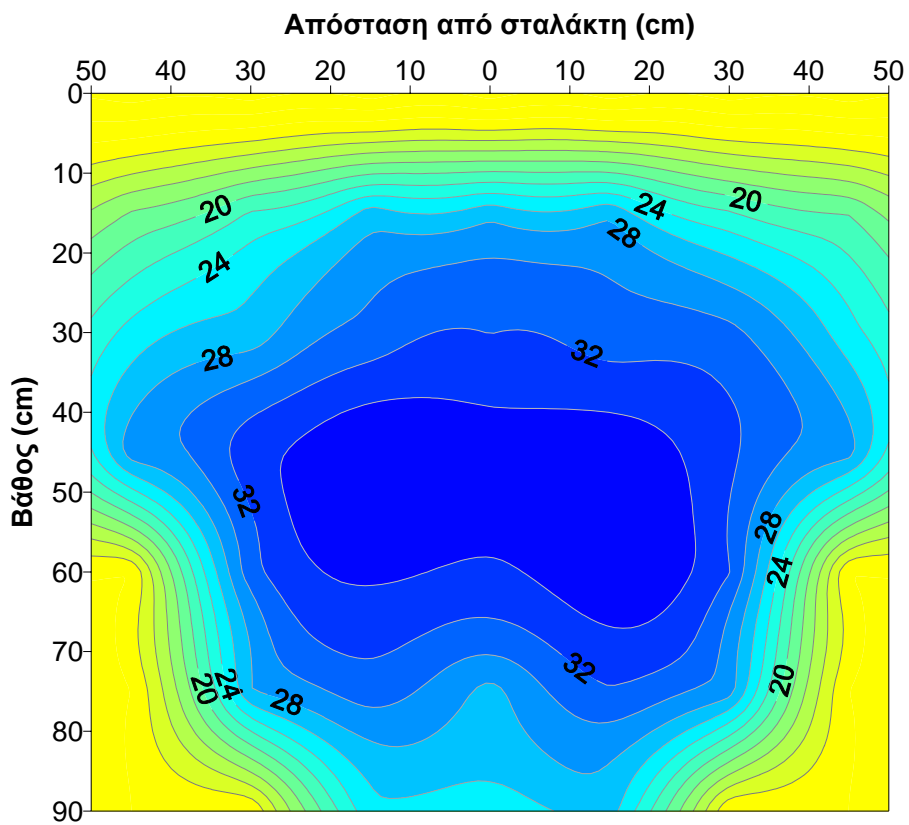
Εικόνα 7.2α: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΣ.



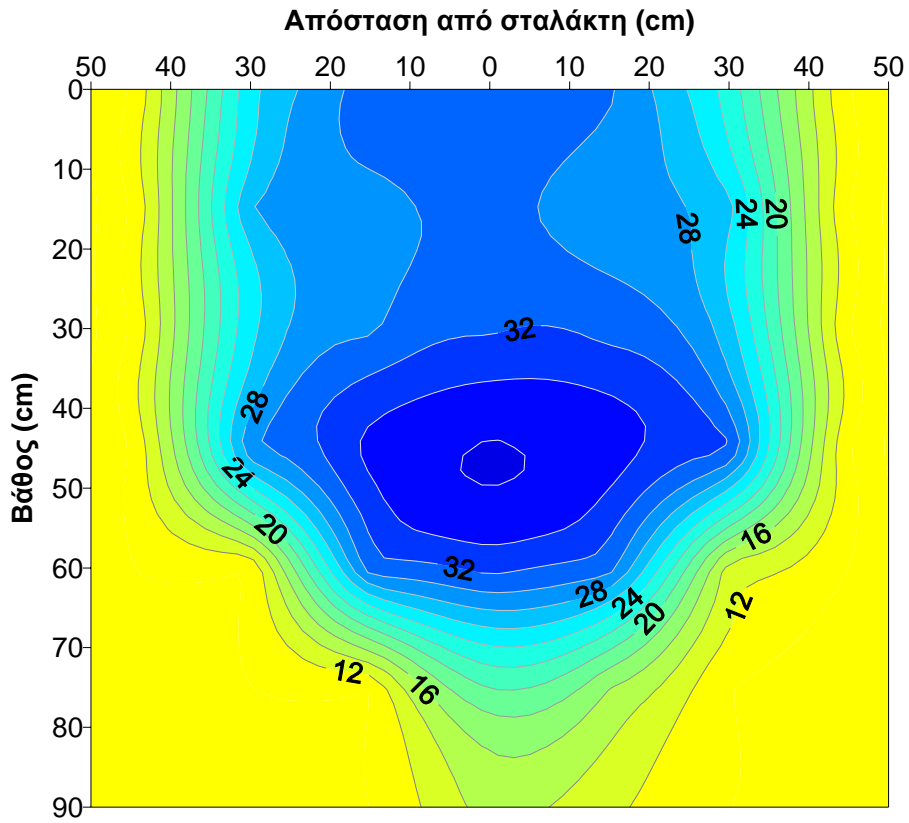
Εικόνα 7.2β: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΔ.



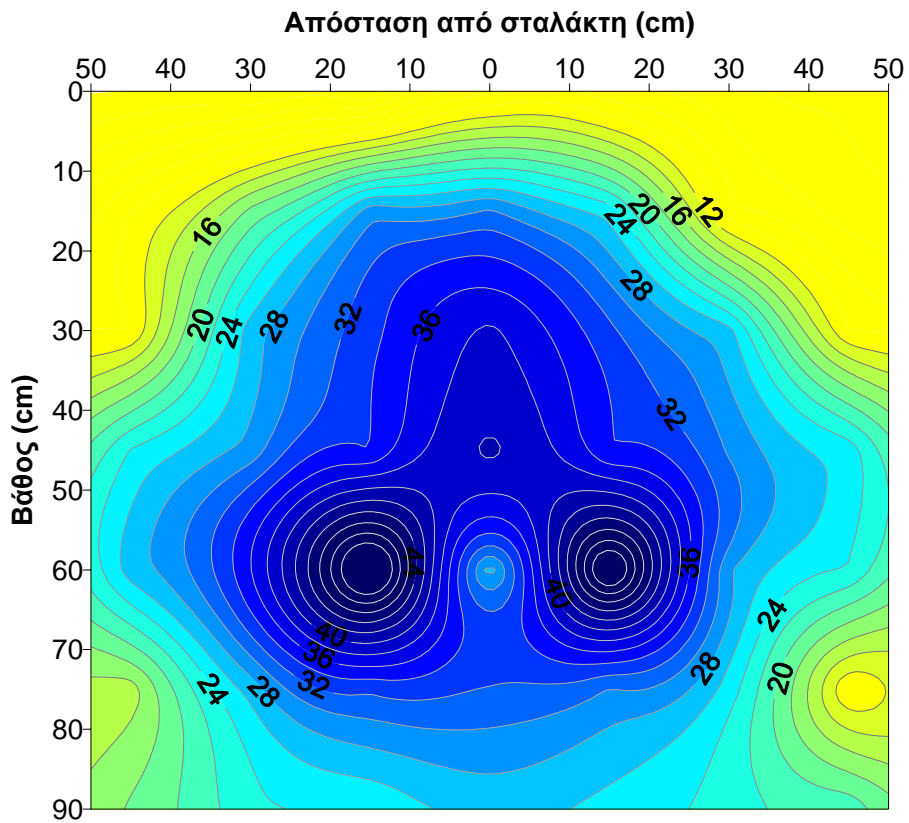
Εικόνα 7.2γ: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΣ.



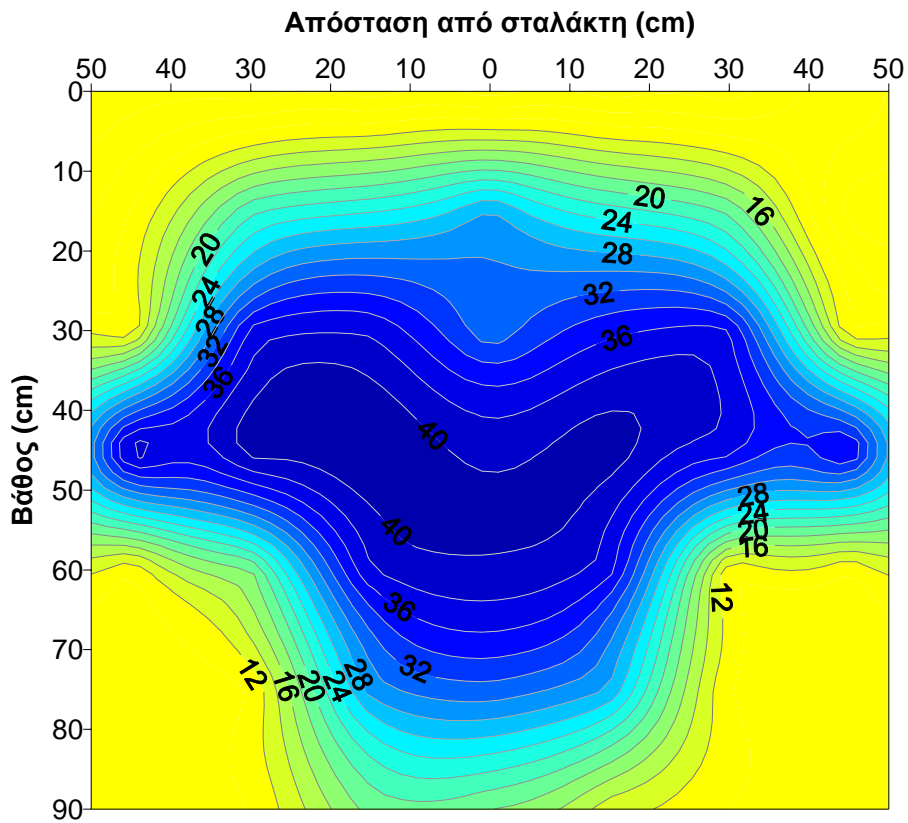
Εικόνα 7.2δ: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΔ.



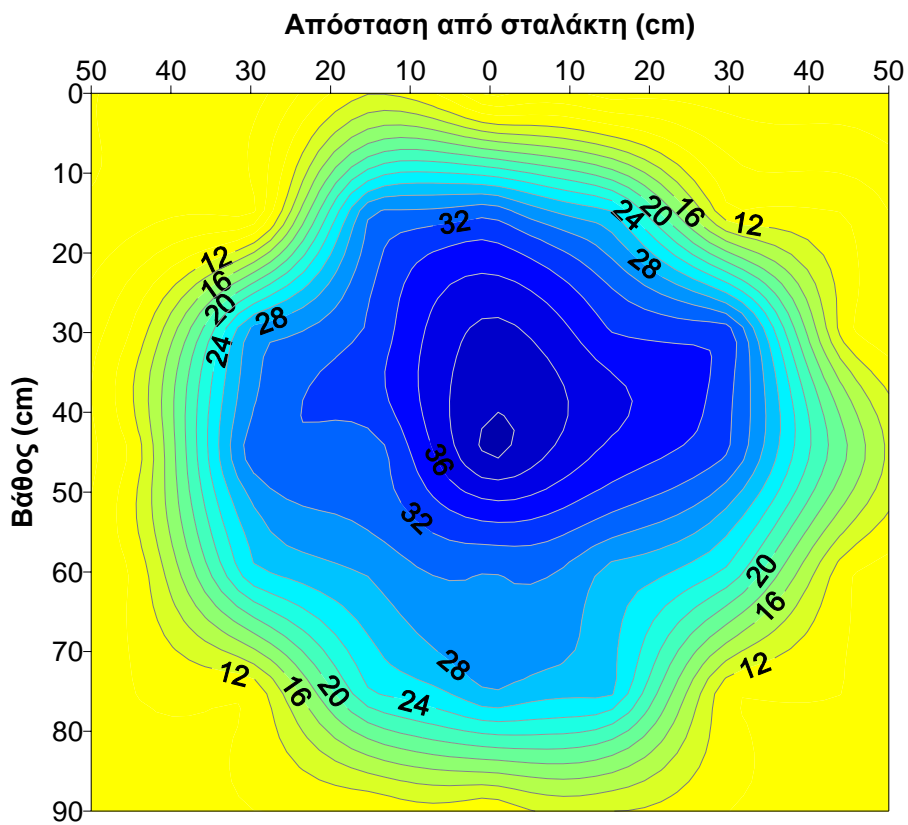
Εικόνα 7.2ε: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΕΒ.



Εικόνα 7.2στ: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΥΒ.



Εικόνα 7.2ζ: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΑΤ.



Εικόνα 7.2η: Κατατομή της εδαφικής υγρασίας (% κ.ο.) στη μεταχείριση ΑΣ.

Στον Πίνακα 7.1, παρουσιάζονται κάποιες παράμετροι που μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση της κατανομής της υγρασίας σε κάθε μεταχείριση. Στον πίνακα παρατίθενται οι μέγιστες τιμές υγρασίας όπως μετρήθηκαν με την διάταξη Trime-FM, καθώς και η ομοιομορφία των τιμών αυτών, όπως υπολογίσθηκε με τον συντελεστή ομοιομορφίας του Christiansen (CU).

Τέλος, στον πίνακα δίδεται η επιφάνεια που κάλυπτε η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (TAW), υπολογισμένη ως η διαφορά μεταξύ των ισοϋψών υγρασίας της υδατοϊκανότητας και του σημείου μάρανσης, ως ποσοστό επί της συνολικής διαβρεχόμενης επιφάνειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1. Παράμετροι αξιολόγησης της διαβροχής του εδάφους

Μεταχείριση	θ_{\max} (% κ.ο.)	CU_θ (%)	A_{TAW} (%)
ΕΣ	42,13	38,0	42,8
ΕΔ	33,89	59,6	68,7
ΕΒ	36,18	52,5	58,3
ΥΣ	41,09	49,5	46,6
ΥΔ	35,98	58,4	55,9
ΥΒ	55,21	57,1	51,5
ΑΣ	40,52	42,2	50,9
ΑΤ	41,74	42,9	40,4

7.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η υψηλής συχνότητας εφαρμογή του νερού κάνει τον χρόνο διήθησης να γίνεται ένα πιο σημαντικό μέρος του αρδευτικού κύκλου και έτσι οι ιδιότητες της ροής του νερού στο έδαφος είναι οι πιο σημαντικές εδαφικές παράμετροι στον σχεδιασμό ενός συστήματος στάγδην άρδευσης (Bresler, 1978). Αυτό συμβαίνει σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα στα οποία μια βραχεία περίοδος διήθησης ακολουθείται από μια μακρά περίοδο ανακατανομής, εξάτμισης και πρόσληψης νερού από τα φυτά. Σε αυτές τις μεθόδους, τα χαρακτηριστικά διαθέσιμης υγρασίας είναι οι πιο σημαντική εδαφική παράμετρος. Οι Lubana et al. (2004) δέχονται την ίδια αρχή αναφέροντας πως στην στάγδην το έδαφος δεν ενδιαφέρει τόσο ως δεξαμενή νερού αφού συνεχώς επαναπληρώνεται όσο πρέπει να μελετάται μαζί με την ένταση εφαρμογής του νερού στην επίδραση της μορφής και της κίνησης του νερού μέσα σε αυτό.

Ο σχεδιασμός των συστημάτων στάγδην άρδευσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της παροχής των σταλακτών και την ισαποχή αυτών. Είναι λοιπόν απαραίτητη η γνώση των αρχών που διέπουν την στάγδην άρδευση ως μια τρισδιάστατη διαδικασία διήθησης προκειμένου αυτές να εφαρμοσθούν στον αγρό. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα από θεωρητικές αναλύσεις σε συνδυασμό με παρατηρήσεις επί του πεδίου, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό των συστημάτων άρδευσης με σταγόνα (Bresler, 1978).

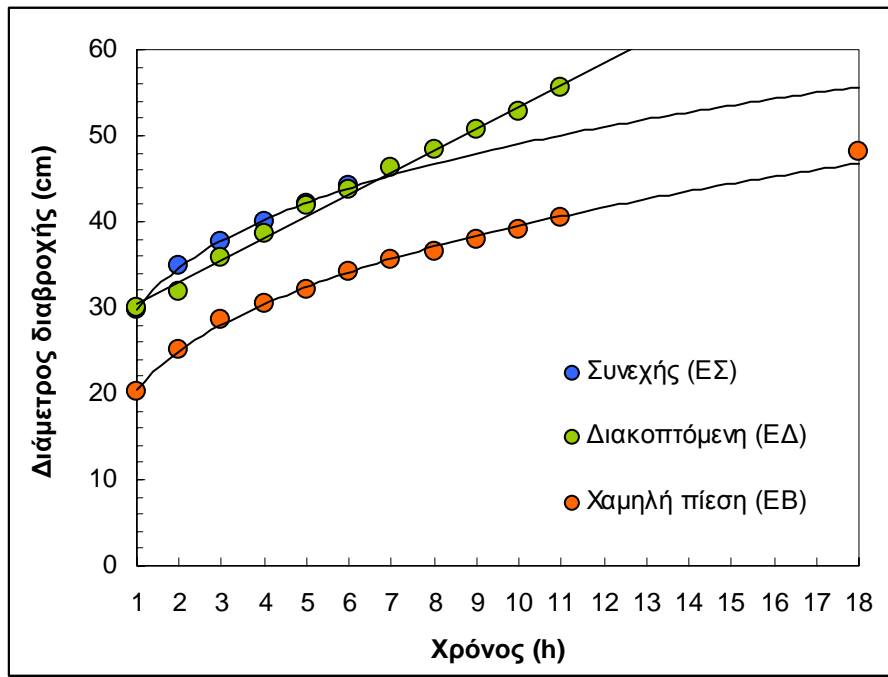
Αρκετά μαθηματικά μοντέλα και εργαστηριακά πειράματα έχουν λάβει χώρα προκειμένου να περιγράψουν την κίνηση του νερού στο έδαφος. Μοντέλα διήθησης από σημειακή πηγή έχουν παρουσιασθεί από τους Wooding (1968), Brandt et al. (1971), Warrick (1974, 1985), Ben-Asher and Phene (1993), Cook et al. (2003). Αρκετοί μέτρησαν σε εδαφολεκάνες (Moncef et al., 2002, Li et al. 2004), ελάχιστοι όμως στον αγρό. Οι Bresler et al. (1971) σύγκριναν δεδομένα πειράματος στο εργαστήριο με θεωρητικές τιμές και ο Roth (1983) σύγκρινε πειραματικά δεδομένα με δεδομένα αγρού. Παρ' όλα αυτά, η επί του πεδίου αξιολόγηση της κίνησης του νερού υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης και ειδικότερα στην περίπτωση της ΥΣΑ δεν έχει τύχει συστηματικής διερεύνησης.

7.3.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΒΡΟΧΗ

Σε αυτήν την έρευνα ελήφθησαν μετρήσεις της κίνησης του νερού με διάφορες τεχνικές προκειμένου να διερευνηθεί το πώς ο ρυθμός παροχής και η μέθοδος εφαρμογής επηρεάζουν την μορφή της διαβροχής σε συστήματα στάγδην άρδευσης.

Τα αποτελέσματα της διαβροχής της επιφάνειας του εδάφους, αφορούν σε μετρήσεις της διαμέτρου διαβροχής τριών σταλακτών για κάθε μια από τις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις, που λαμβάνονταν σε μια καθαρή από βλάστηση επιφάνεια, κατά μήκος ενός σταλακτηφόρου. Οι Ben-Asher et al. (2003) μέτρησαν την εξάπλωση του υγρού μετώπου στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας καρφιά ως δείκτες που έμπηξαν στο έδαφος σε μικρά καταμετρημένα χρονικά διαστήματα για να σημειώσουν την θέση του υγρού μετώπου στην ακόρεστη ζώνη. Το εύρος της κίνησης του επιφανειακού υγρού μετώπου μετρήθηκε χειρωνακτικά 2 ώρες μετά το τέλος της άρδευσης κάθετα στον σταλάκτη από τους Dehghanisanij et al. (2004).

Το γεγονός ότι η εφαρμογή του νερού διακοπτόμενα αυξάνει το πλάτος του υγρού μετώπου, παρατηρείται ασφαλώς στην εδαφική επιφάνεια όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.3 που δίδει την μεταβολή της διαμέτρου διαβροχής στην επιφάνεια του εδάφους για τις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις, ήτοι την ΕΣ, την ΕΔ και την ΕΒ. Η διάμετρος έφθασε στην μέγιστη απόσταση από το σημείο διανομής στην περίπτωση της διακοπτόμενης εφαρμογής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.3 η υψηλότερη ένταση εφαρμογής του νερού είχε ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη κίνηση του υγρού μετώπου.



Εικόνα 7.3: Η μεταβολή της διαμέτρου διαβροχής στην επιφάνεια του εδάφους στις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις.

Η τάση ήταν η ίδια για τις περιπτώσεις της συνεχούς (ΕΣ) και της άρδευσης με χαμηλή παροχή (ΕΒ) και περιγράφεται με εξισώσεις εκθετικής μορφής (Peifu et al. 2005) αλλά διέφερε στην περίπτωση της διακοπτόμενης εφαρμογής (ΕΔ) και περιγράφεται με τη χρήση μιας γραμμικής εξίσωσης:

$$D_w = at^{\beta} \tag{7:1a}$$

$$D_w = at + \beta \tag{7:1β}$$

Οι παράμετροι των εξισώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως όσο υψηλότερη η παροχή τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφανειακή επέκταση του νερού και κατά συνέπεια η επιφάνεια διήθησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2. Παράμετροι εκτίμησης της διαβρεχόμενης διαμέτρου με τις αντίστοιχες τιμές του R²

Άρδευση	α	β	R ²
Συνεχής (ΕΣ)	29,81	0,216	0,9987
Διακοπτόμενη (ΕΔ)	2,45	27,98	0,9936
Χαμηλής πίεσης (ΕΒ)	20,43	0,286	0,9968

7.3.2. ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στον σχεδιασμό ενός συστήματος στάγδην ο όγκος που διαβρέχεται από έναν σταλάκτη είναι σημαντικός. Αυτός πρέπει να είναι γνωστός προκειμένου να προσδιορισθεί ο συνολικός αριθμός σταλακτών που απαιτείται για να διαβρέξει έναν μεγάλο όγκο εδάφους που χρειάζεται για να καλύψει τις απαιτήσεις μιας καλλιέργειας.

Πολύ λίγη προσοχή έχει δοθεί στην εκτίμηση της κατανομής του νερού από την στάγδην άρδευση κάτω από πραγματικές συνθήκες αγρού. Η έλλειψη κατανόησης του πως η κατανομή του εδαφικού νερού επηρεάζεται από τις υδραυλικές ιδιότητες του ακόρεστου εδάφους μερικές φορές έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη διαχείριση και κατά συνέπεια την χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού, (Lubana et al., 2004).

Το σχήμα και ο συνολικός όγκος του εδάφους που διαβρέχεται κάτω από έναν σταλάκτη τα οποία ποικίλουν πολύ αναλόγως των υδραυλικών παραμέτρων του εδάφους, του αριθμού των σταλακτών, της παροχής των και της συχνότητας άρδευσης, πρέπει να προσδιορίζεται έτσι ώστε να παρέχεται στα φυτά ένας επαρκής διαβρεγμένος εδαφικός όγκος που να συναντά τις απαιτήσεις τους σε νερό.

Η μορφή της διαβροχής για κάθε μεταχείριση διερευνήθηκε στο πειραματικό αγροτεμάχιο σε όρυγμα που εκσκάφθηκε κάθετα στις γραμμές των πλευρικών. Η θέση του υγρού μετώπου καταγραφόταν με τη βοήθεια ενός πλέγματος (καμβά) που κατασκευάστηκε με διαστάσεις 1 x 1 m και διαστάσεις πλέγματος 0,1 x 0,1 m.

Ο όρος υγρό μέτωπο όπως χρησιμοποιείται εδώ αναφέρεται ουσιαστικά στην καταγραφή των ορατών διακριτών ορίων μεταξύ διαβρεγμένης και ξηρής επιφάνειας (Oron, 1981). Το όριο αυτό σαφώς και δεν αποτελεί το πραγματικό υγρό μέτωπο αφού δεν προσδιορίστηκε με την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας προκειμένου αυτό να προσδιορισθεί επακριβώς, πλην όμως η διαδικασία που ακολουθήθηκε αποτελεί κοινή πρακτική μεταξύ αρκετών ερευνητών που ασχολήθηκαν με το ζήτημα (Battam and Sutton, 2003, Hanson et al., 1997, Hanson and May, 2004, Singh et al., 2006). Παρ' όλη την έλλειψη ακρίβειας στον προσδιορισμό του υγρού μετώπου, η οπτική αυτή καταγραφή αποδίδει την διαφοροποίηση της μορφής της κατανομής του νερού υπό τις διαφορετικές τεχνικές εφαρμογής του.

Ο Bresler (1978) αναφέρει πως τα υγρά μέτωπα είναι σημαντικά στην στάγδην διήθηση επειδή δείχνουν τα όρια του αρδευόμενου εδαφικού όγκου. Οι Amir and Dag (1993) χρησιμοποίησαν την τεχνική εκσκαφής τάφρου για να παρατηρήσουν και να καταγράψουν την έκταση της διαβροχής στο βάθος του εδάφους που αρδευόταν από

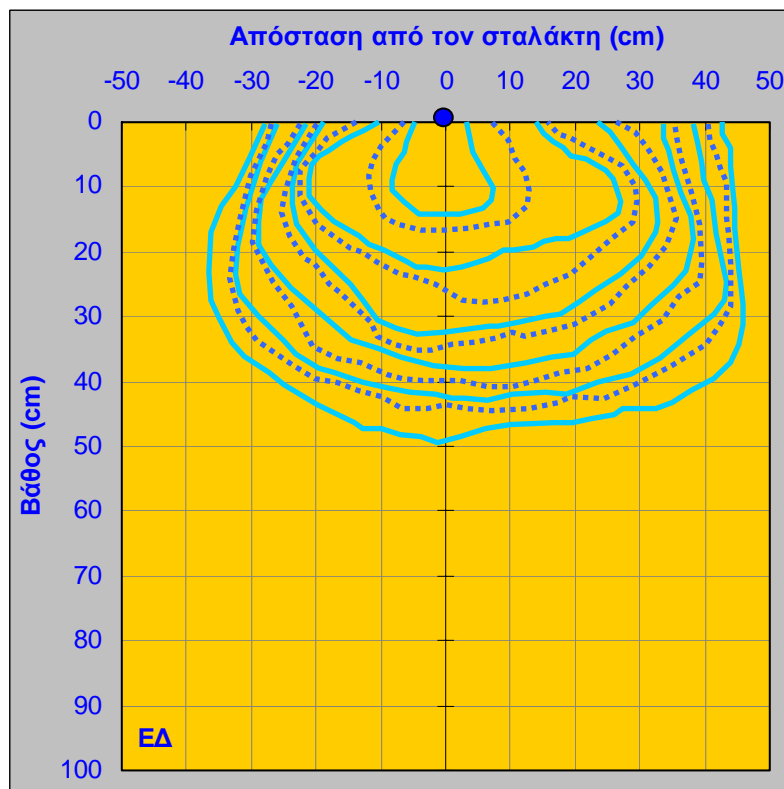
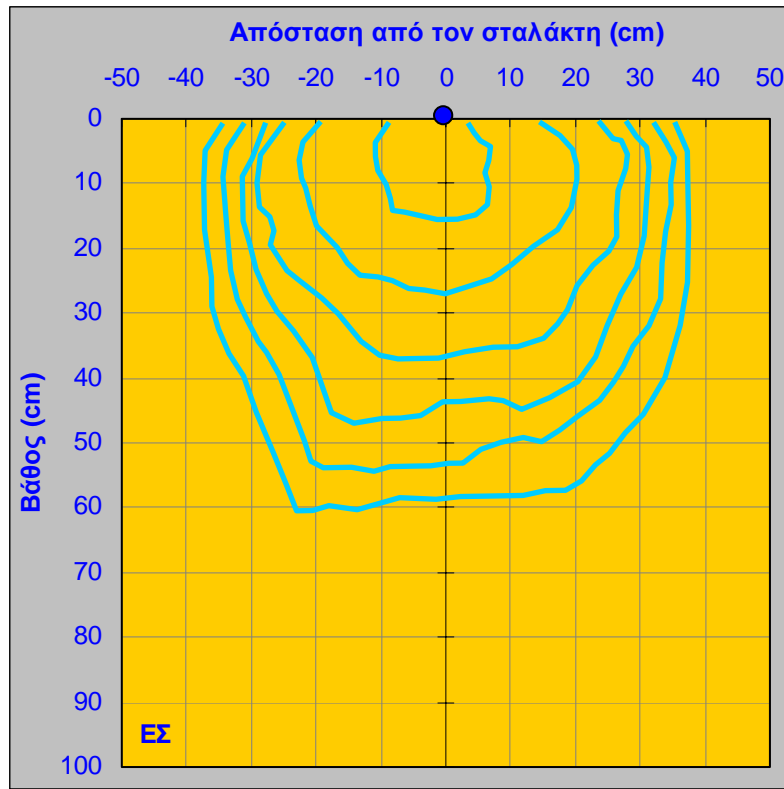
κινούμενο σύστημα μικροάρδευσης. Οι Al-Quinna and Abu-Awwad (2001) διερεύνησαν την κίνηση του υγρού μετώπου κατασκευάζοντας τάφρο και χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα και αναμιγνύοντας το αρδευτικό νερό με υδατοδιαλυτό κόκκινο χρώμα. Την ίδια τεχνική χρησιμοποίησε και ο Oron (1981) διανοίγοντας τάφρο για τον προσδιορισμό του υγρού μετώπου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υγρού μετώπου ως προς το βάθος παρουσιάζονται στις Εικόνες 7.4α έως 7.4δ. Η μορφή της διαβροχής δείχνει μια καθαρή διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων.

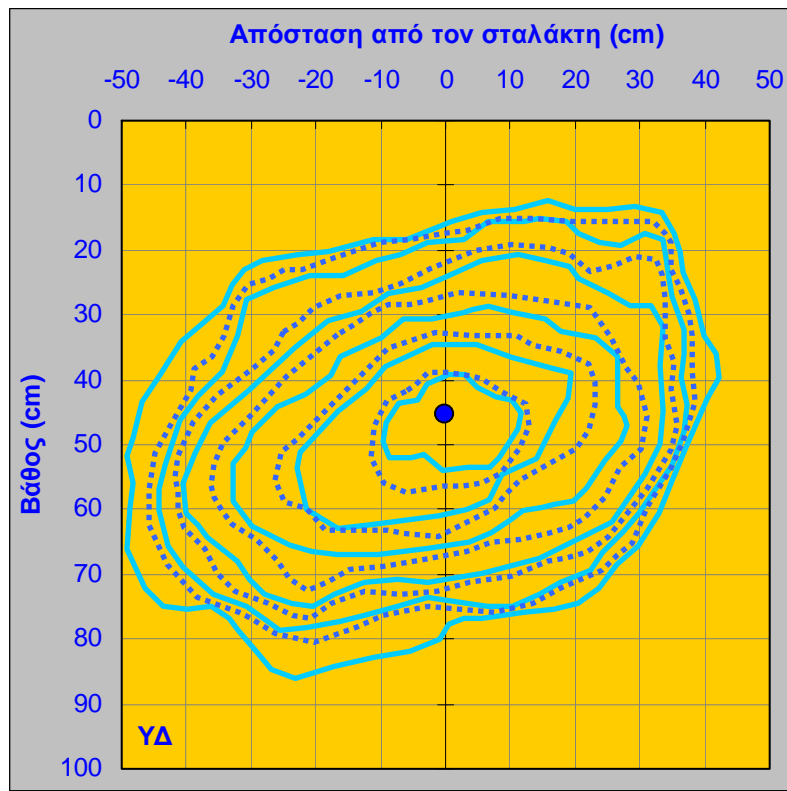
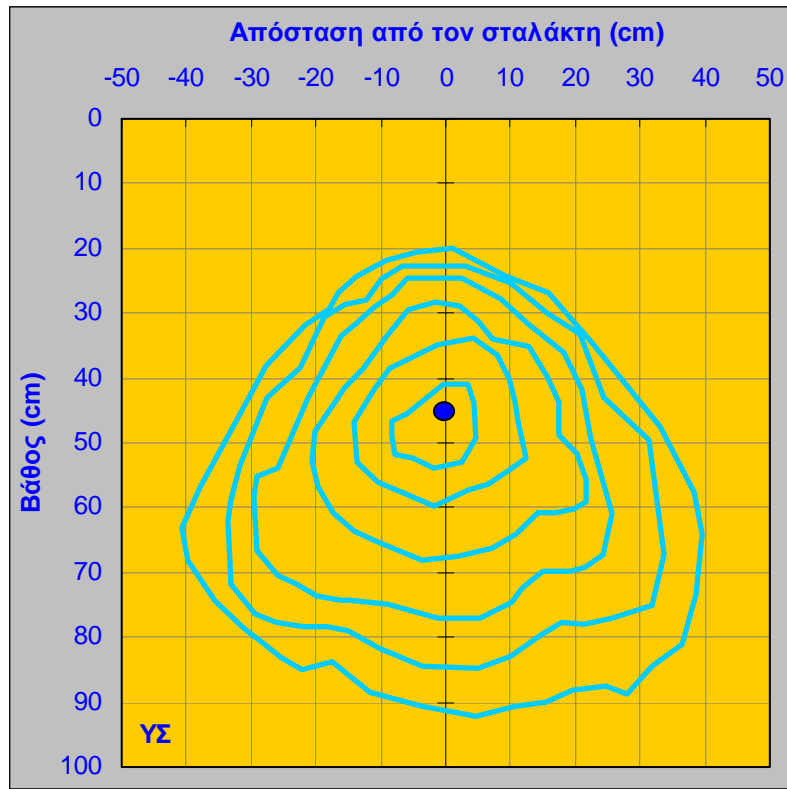
Γενική διαπίστωση αποτελεί η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υπόγειο σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Ταυτοχρόνως παρατηρείται σχετικά μικρότερη καθοδική κίνηση στις μεταχειρίσεις της διακοπτόμενης εφαρμογής και ελαφρά μεγαλύτερη ανοδική κίνηση στην ΥΔ σχετικά με την ΥΣ. Στην διακοπτόμενη άρδευση οι επιφάνειες διαβροχής είναι περισσότερο κυκλικές παρά ελλειπτικές.

Στην περίπτωση άρδευσης με χαμηλή παροχή, υπάρχει σαφής διαφοροποίηση με τα προηγούμενα καθώς η καθοδική κίνηση του νερού είναι μεγαλύτερη και η οριζόντια μικρότερη από τις άλλες μεταχειρίσεις. Ειδικότερα στην περίπτωση της ΥΒ παρατηρείται μικρή ανοδική κίνηση του νερού ενώ καταγράφεται η πλέον αυξημένη καθοδική κίνηση που δείχνει απώλεια από το ενεργό ριζόστρωμα.

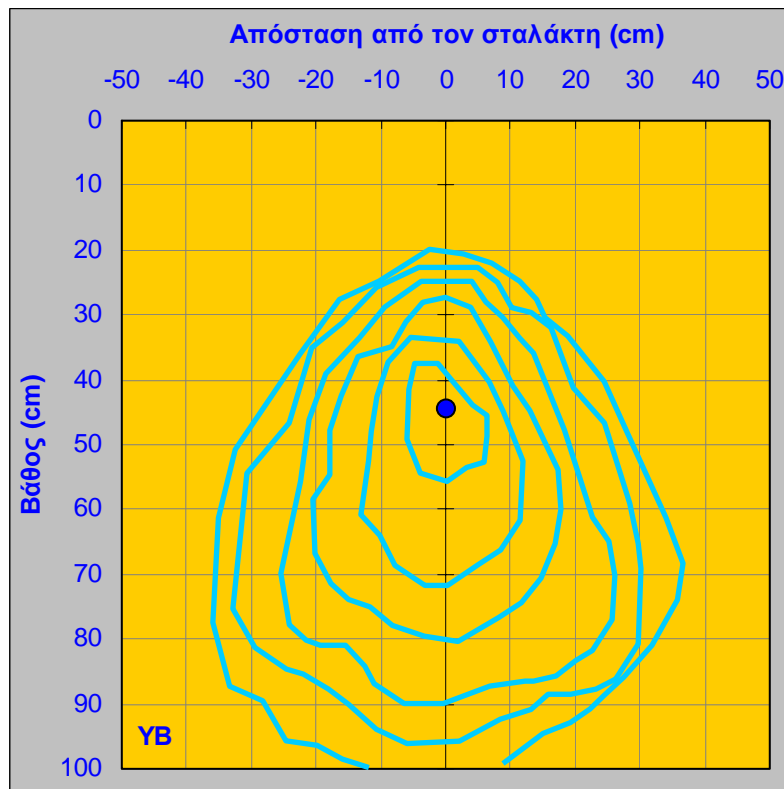
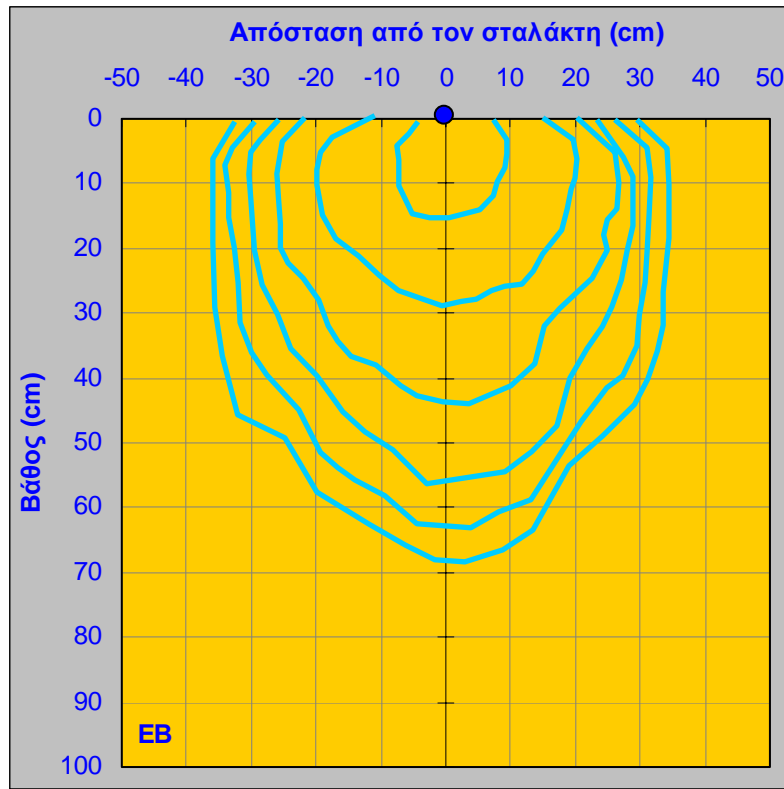
Στην εφαρμογή αέρα, η μορφή του υγρού μετώπου ήταν παρόμοια με αυτήν της συμβατικής υπόγειας εφαρμογής (ΥΣ) με τη διαφορά πως κυρίως στην μεταχείριση συνεχούς παροχής αέρα (ΑΣ), παρατηρήθηκε ακανόνιστη και τυχαία κίνηση του νερού προς της εδαφική επιφάνεια με τη μορφή «καμινάδας». Σε κάποιες περιπτώσεις, αυτό γινόταν ορατό και στην εδαφική επιφάνεια.



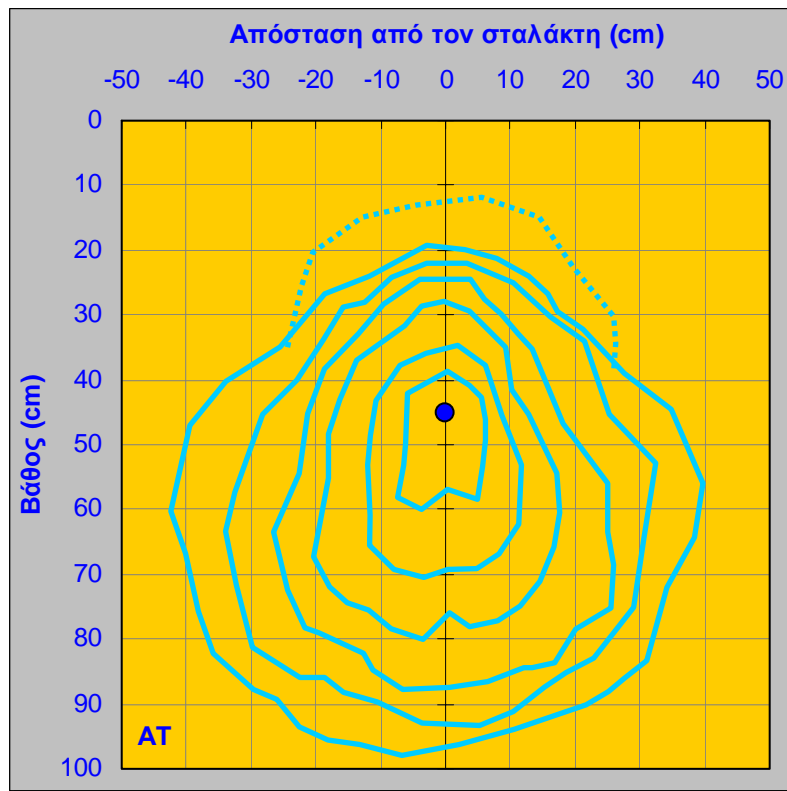
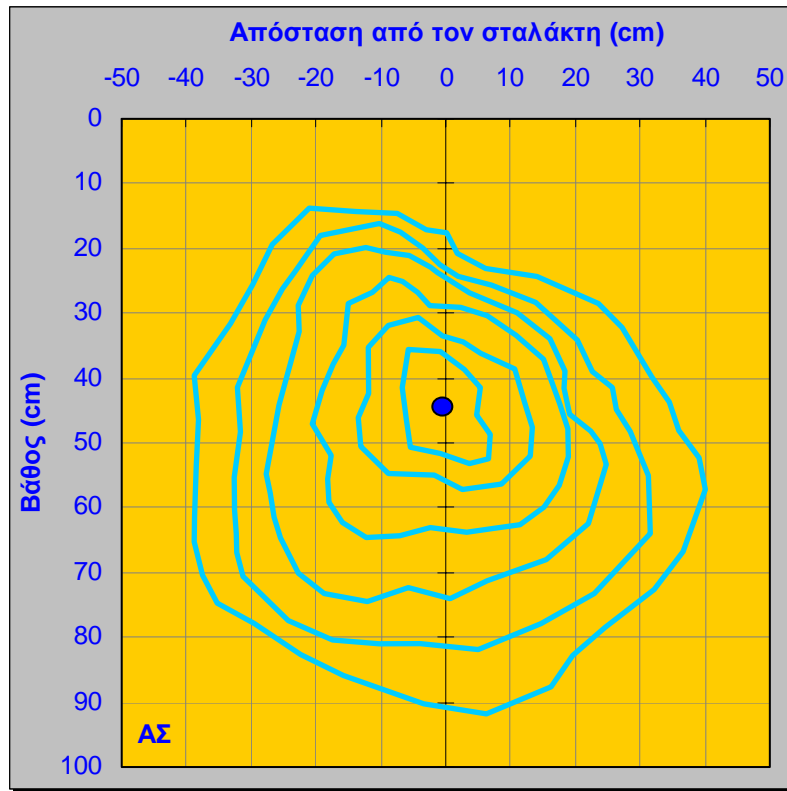
Εικόνα 7.4α: Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή ΕΣ (επάνω) και διακοπτόμενη ΕΔ (κάτω) επιφανειακή εφαρμογή του νερού.



Εικόνα 7.4β: Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή ΥΣ (επάνω) και διακοπτόμενη ΥΔ (κάτω) υπόγεια εφαρμογή του νερού.



Εικόνα 7.4γ: Καταγραφή του υγρού μετώπου στην επιφανειακή EB (επάνω) και υπόγεια YB (κάτω) εφαρμογή του νερού με χαμηλή παροχή.



Εικόνα 7.4δ: Καταγραφή του υγρού μετώπου στην συνεχή εφαρμογή αέρα ΑΣ (επάνω) και στην εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης ΑΤ (κάτω).

7.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Διακύμανση και κατανομή της υγρασίας

Τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με την διαπίστωση των Neibling and Gallian (1997), για την ικανότητα του συστήματος άρδευσης με υπόγειους σταλακτηφόρους αγωγούς να διατηρεί την εδαφική υγρασία στο βάθος των 30 – 45 cm, σε επίπεδα τέτοια ώστε η τιμή της να μην πέφτει από το 0,8 της ΔΥ, τιμή κάτω από την οποία το έδαφος χαρακτηρίζεται ξηρό στους περισσότερους τύπους εδαφών. Ανάλογη διαπίστωση αναφέρουν και οι Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη κ.ά., (2000) και Sakellariou-Makrantonaki et al., (2001, 2002b), μετά από πειραματική καλλιέργεια στην ίδια περιοχή.

Η καλύτερη ομοιομορφία της υγρασίας στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης φαίνεται να οφείλεται στο γεγονός ότι η αυτή ποσότητα νερού κατέλαβε μεγαλύτερο εδαφικό όγκο, αφού όπως παρατηρήθηκε και στην καταγραφή του υγρού μετώπου, και εδώ υπήρξε μεγαλύτερη οριζόντια ανάπτυξη.

Η εφαρμογή αέρα επέδρασε στην υγρασία του εδάφους στο ριζόστρωμα μειώνοντας την περιεκτικότητα σε νερό (ΑΣ) ή απωθώντας το από το εγγύτερο περιβάλλον του σταλάκτη (ΑΤ).

Δεδομένα τέτοια έχουν πρακτικό ενδιαφέρον στον σχεδιασμό αρδευτικών συστημάτων, ειδικότερα όταν η περίοδος ανακατανομής είναι βραχεία συγκρινόμενη με την διήθηση. Η χρήση αυτών των τεχνικών δίδει την δυνατότητα ελέγχου του διαβρεχόμενου όγκου του εδάφους ρυθμίζοντας την παροχή σύμφωνα με τις υδραυλικές του ιδιότητες (Bresler, 1978).

Διαβροχή του εδάφους

Στην αξιολόγηση της επιφανειακής διαβροχής του εδάφους, τα αποτελέσματα που αφορούν στην συμβατική (ΕΣ) άρδευση παρουσιάζονται παραπλήσια με αυτά που έχουν παρουσιάσει άλλοι ερευνητές για την επιφανειακή στάγδην, τόσο ως προς την τάση όσο και ως προς τις τιμές των παραμέτρων των εκθετικών εξισώσεων που χρησιμοποίησαν για να εκτιμήσουν την μεταβολή της διαμέτρου.

Στην επιφανειακή διακοπτόμενη άρδευση η ανάπτυξη της διαμέτρου διαβροχής, περιγράφεται με γραμμική εξίσωση. Οι εξισώσεις μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση της διάρκειας της άρδευσης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή επιφανειακή διαβροχή.

Το ποσοστό της επιφάνειας διαβροχής συγκρινόμενο με την συνολική επιφάνεια εξαρτάται από την παροχή του σταλάκτη, την ισαποχή και τον εδαφικό τύπο (Keller and Karmeli, 1974). Οι Goldberg and Shmueli (1970) διαπίστωσαν πως ο ρυθμός της κίνησης του νερού κατά την οριζόντιο και το τελικό εύρος της επιφάνειας διαβροχής είναι συναρτήσεις της ποσότητας και του ρυθμού εφαρμογής του νερού και του εδαφικού τύπου.

Στην ως προς το βάθος διαβροχή του εδάφους, γενική διαπίστωση αποτελεί η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υπόγειο σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Ταυτοχρόνως παρατηρείται σχετικά μικρότερη καθοδική κίνηση στις μεταχειρίσεις της διακοπτόμενης εφαρμογής και ελαφρά μεγαλύτερη ανοδική κίνηση στην ΥΔ σχετικά με την ΥΣ. Στην διακοπτόμενη άρδευση οι επιφάνειες διαβροχής είναι περισσότερο κυκλικές παρά ελλειπτικές.

Η αιτία για αυτό αποδίδεται στην σύγκρουση μεταξύ τριχοειδούς κίνησης και βαρυτικής κίνησης για τον έλεγχο της κίνησης του νερού. Όταν το νερό εφαρμόζεται συνεχόμενα η βαρύτητα φαίνεται να υπερνικά επειδή το νερό εισέρχεται σε ένα ήδη διαβρεγμένο σύστημα και η κατακόρυφη κίνηση φαίνεται να επικρατεί. Όταν το νερό εφαρμόζεται διακοπτόμενα η τριχοειδής φαίνεται να υπερνικά έλκοντας το νερό προς τα έξω και προς τα πάνω σε σχέση με τον σταλάκτη προς ένα ξηρότερο έδαφος. Καθώς το έδαφος συνεχίζει να διαβρέχεται, η βαρύτητα παίζει έναν σημαντικότερο ρόλο εφαρμόζοντας μια κατακόρυφη έλξη στο «νέο» νερό που προστίθεται, αλλά το «παλαιό» νερό συνεχίζει να κινείται έξω και πάνω από το επίπεδο του σταλάκτη λόγω των τριχοειδών δυνάμεων (Bristow et al., 2000).

Η κίνηση του υγρού μετώπου σε ένα έδαφος υπό μια πηγή στάγδην άρδευσης σχετίζεται με τον εδαφικό τύπο, την αρχική εδαφική υγρασία και τον ρυθμό παροχής του νερού (Hachum et al., 1976, Hawatmeh and Battikhi 1983, Goldberg and Shmueli, 1970, Goldberg et al., 1971). Οι Brandt et al. (1971) ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για τη διερεύνηση της διήθησης από μια πηγή στάγδην. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως μια αύξηση στην παροχή του σταλάκτη προκάλεσε αύξηση της διαβρεχόμενης επιφάνειας κατά την οριζόντιο και μείωση της διαβροχής ως προς το βάθος. Το ίδιο αναφέρεται και στην μελέτη των Al-Qinna and Abu-Awwad (2001). Οι Goldberg et al. (1971) αναφέρουν πως είναι δυνατό να αυξηθεί κατά κάποιο τρόπο η οριζόντια εξάπλωση του υγρού μετώπου αυξάνοντας την παροχή των σταλακτών ή την

ποσότητα του νερού που εφαρμόζεται.

Οι Bristow et al. (2000) διαπίστωσαν ότι τα εφαρμοζόμενα με υπόγειο σύστημα λιπάσματα είχαν μεγαλύτερη οριζόντια εξάπλωση και μικρότερη κατακόρυφη κίνηση με την εφαρμογή μιας στρατηγικής χορήγησης του λιπάσματος στην αρχή της άρδευσης λόγω της κίνησης του νερού έξω και πάνω από το επίπεδο του σταλάκτη λόγω των τριχοειδών δυνάμεων.

Οι Ben-Asher et al. (2003) αναφέρουν πως η παροχή των σταλακτών επιδρά σημαντικά στις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους. Υψηλές παροχές και κατά συνέπεια υψηλή ένταση διύγρυνσης του ξηρού εδάφους προκαλεί υποβάθμιση της δομής του. Υψηλή ένταση διαβροχής διαχωρίζει τα εδαφικά συσσωματώματα, μειώνει την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα και αυξάνει την οριζόντια ροή (πιθανή απορροή) από τον σταλάκτη. Οι Al-Quinna and Abu-Awwad (2001) διερεύνησαν την επίδραση της παροχής στην διαβροχή του εδάφους και διαπίστωσαν ότι αυξάνοντας την παροχή αυξήθηκε η οριζόντια διαβροχή ενώ παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μείωση της κατακόρυφης διαβροχής.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συστήνουν πως με τη στρατηγική της διακοπτόμενης άρδευσης μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος της αύξησης της αποδοτικότητας χρήσης νερού και μείωσης του κινδύνου έκπλυσης από το ριζόστρωμα.

Μοντελοποίηση της παραγωγικότητας της καλλιέργειας

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα που τίθεται στο κεφάλαιο αυτό είναι να τεθεί η παραγωγικότητα ως συνάρτηση α) της θερμοκρασίας του αέρα, β) της ηλιακής ακτινοβολίας, γ) του εφαρμοζόμενου νερού. Ζητείται λοιπόν η εύρεση μιας σχέσεως της μορφής:

$$Y_i' = T^a R_s^b W^c, \quad [8:1]$$

όπου έχει τεθεί:

Y_i' = η παραγωγικότητα (Mg/στρ),

T = η θερμοκρασία του αέρα (βαθμομημέρες),

R_s = η ηλιακή ακτινοβολία (GJ m⁻²),

W = το νερό εφαρμογής (mm).

Επειδή υπάρχουν n μετρήσεις της παραγωγικότητας Y_i , θα υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των μετρημένων τιμών και αυτών που θα προκύψουν από την ανάπτυξη του μοντέλου της Εξίσωσης 8:1, δηλαδή:

$$\varepsilon_i = Y_i' - Y_i. \quad [8:2]$$

Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στην εύρεση του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος της συνάρτησης ε_i , δηλαδή:

$$f = \text{minimum} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \right). \quad [8:3]$$

Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης αυτής f , η οποία καλείται **αντικειμενική συνάρτηση** και σημειωτέον είναι εντόνως μη γραμμική, μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους της ποσοτικής ανάλυσης και ανάγεται στο γενικότερο πρόβλημα **της βελτιστοποίησης (optimization) μας μη γραμμικής συναρτήσεως χωρίς περιορισμούς**. Από το σύνολο των υπάρχουσών μεθόδων επιλέχθηκε η μέθοδος των συζυγών κλίσεων ή μέθοδος των Fletcher-Reeves για λόγους που θα αναφερθούν κατωτέρω.

8.2. ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

Για την πλήρη κατανόηση της μεθόδου παρατίθενται κατ'αρχήν μερικοί χρήσιμοι ορισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια:

Ορισμός 1.

Ονομάζεται κλίση (**gradient**) μιας συναρτήσεως $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in C^1$ το διάνυσμα ∇f το οποίο γράφεται ως εξής:

$$\nabla f = \text{grad}f = \begin{bmatrix} \partial f(\bar{x})/\partial x_1 \\ \partial f(\bar{x})/\partial x_2 \\ \dots\dots\dots \\ \partial f(\bar{x})/\partial x_n \end{bmatrix} \quad [8:4]$$

Σημείωση: Ορίζουμε ότι μια συνάρτηση $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in C^k$, όταν υπάρχει η παράγωγος κ τάξης της συνάρτησης $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ και είναι συνεχής.

Ορισμός 2.

Η κλίση μιας συνάρτησης f σε ένα σημείο \bar{x}_0 είναι ένα διάνυσμα κάθετο στην καμπύλη της επιφάνειας $f(\bar{x})$ που περνάει από το σημείο \bar{x}_0 και ορίζει την κατεύθυνση της μέγιστης αύξησης-ανόδου της $f(\bar{x})$ στο σημείο \bar{x}_0 (**steepest ascent direction**). Η αντίθετη διεύθυνση της κλίσης ορίζει την κατεύθυνση της μέγιστης μείωσης-πτώσης (**steepest descent direction**). Εύλογον είναι ότι χρησιμοποιούμε την Ευκλείδεια νόρμη που για το διάνυσμα \bar{x} ορίζεται ως ακολούθως:

$$\|\bar{x}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Κάθε διάνυσμα λοιπόν \bar{u} κάθετο πάνω στην κλίση $\nabla f(\bar{x}_0)$ επαληθεύει τη σχέση:

$$\bar{u} \cdot \nabla f(\bar{x}_0) = 0$$

Ορισμός 3.

Όταν η συνάρτηση $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in C^2$, ο πίνακας που περιέχει τις δευτερές μερικές παραγώγους στο σημείο \bar{x}_0 , είναι τετραγωνικός διάστασης n και ονομάζεται Hessian πίνακας και συμβολίζεται ως $\nabla(\nabla f(\bar{x}))$ ή $H(\bar{x}_2)$.

Ο Hessian πίνακας για $n=3$ π.χ., έχει την ακόλουθη μορφή:

$$H(\bar{x}_3) = \nabla(\nabla f(\bar{x})) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_1 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_2 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_3 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_3 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_3^2} \end{bmatrix}. \quad [8:5]$$

Βεβαίως όταν η συνάρτηση $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in C^k$ τότε ισχύει:

$$\frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f(\bar{x})}{\partial x_j \partial x_i}$$

δηλαδή ο πίνακας είναι στην περίπτωση αυτή τετραγωνικός και **συμμετρικός**.

Σημείωση: Τονίζεται ιδιαίτερα εδώ ότι:

$$\nabla(\nabla f(\bar{x})) \neq \nabla^2 f(\bar{x}).$$

Το αριστερό μέλος της σχέσης αυτής είναι τανυστής δευτέρας τάξης συμμετρικός, ενώ το δεξιό μέλος καλείται Laplacian τελεστής και είναι ίσος με $\nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$.

Ορισμός 4.

Το σύνολο των σημείων $\bar{x} = \bar{x}_0 + \lambda \bar{s}$, $\lambda \geq 0$ είναι η ευθεία σε ένα n -διάστατο χώρο.

Το διάνυσμα \bar{s} αποτελεί την κατεύθυνση της ευθείας. Η παράγωγος μίας συνάρτησης f στην κατεύθυνση της παραπάνω ευθείας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{df}{d\lambda} = \bar{s}^T \cdot \nabla f \quad [8:6]$$

ενώ η καμπυλότητα κατά μήκος της ευθείας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d^2 f}{d\lambda^2} = \bar{s}^T \cdot \nabla(\nabla f) \cdot \bar{s} = \bar{s}^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}. \quad [8:7]$$

Όταν ένα σημείο \bar{x}^* είναι τοπικό ελάχιστο, τότε κατά μήκος κάθε ευθείας $\bar{x} = \bar{x}^* + \lambda \bar{s}$ που διέρχεται από το \bar{x}^* , η συνάρτηση έχει μηδενική παράγωγο και μη αρνητική καμπυλότητα.

Ορισμός 5.

Ένα διάνυσμα \bar{s}_k ονομάζεται **διεύθυνση μείωσης-πτώσης** (nonascent direction) στο σημείο \bar{x}_k αν ισχύει:

194 ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

$$\vec{s}_k^T \cdot \nabla f(\vec{x}_k) \leq 0$$

Για την περίπτωση που ισχύει μόνο το $<$, έχουμε **διεύθυνση αυστηρής μείωσης-πτώσης** (descent direction) στο σημείο \vec{x}_k .

Ένα διάνυσμα \vec{s}_k ονομάζεται **διεύθυνση αύξησης** (nondescent direction) στο σημείο \vec{x}_k αν ισχύει:

$$\vec{s}_k^T \cdot \nabla f(\vec{x}_k) \geq 0.$$

Για την περίπτωση που ισχύει μόνο το $>$, έχουμε **διεύθυνση αυστηρής αύξησης** (ascent direction) στο σημείο \vec{x}_k .

Ορισμός 6.

Ένα διάνυσμα \vec{s}_k ονομάζεται **μη θετικής καμπυλότητας** (nonpositive curvature) στο σημείο \vec{x}_k αν ισχύει:

$$\vec{s}_k^T \cdot \nabla (\nabla f(\vec{x}_k)) \cdot \vec{s}_k \leq 0.$$

Για την περίπτωση που ισχύει μόνο το $<$, έχουμε **διεύθυνση αρνητικής καμπυλότητας** (negative curvature) στο σημείο \vec{x}_k .

Ένα διάνυσμα \vec{s}_k ονομάζεται **μη αρνητικής καμπυλότητας** (nonnegative curvature) στο σημείο \vec{x}_k αν ισχύει:

$$\vec{s}_k^T \cdot \nabla (\nabla f(\vec{x}_k)) \cdot \vec{s}_k \geq 0.$$

Για την περίπτωση που ισχύει μόνο το $>$, έχουμε **διεύθυνση θετικής καμπυλότητας** (positive curvature) στο σημείο \vec{x}_k .

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς όταν ένα σημείο \vec{x}^* είναι τοπικό ελάχιστο, τότε κατά μήκος κάθε ευθείας $\vec{x} = \vec{x}^* + \lambda \vec{s}$ που διέρχεται από το \vec{x}^* , η συνάρτηση έχει μηδενική παράγωγο και μη αρνητική καμπυλότητα στο \vec{x}^* . Δηλαδή θα ισχύει:

$$\vec{s}^T \cdot \nabla f(\vec{x}^*) = 0 \text{ και } \vec{s}^T \cdot \nabla (\nabla f(\vec{x}^*)) \cdot \vec{s} \geq 0$$

Από τις σχέσεις αυτές και για κάθε διεύθυνση \vec{s} από την πρώτη σχέση παίρνουμε:

$$\nabla f(\vec{x}^*) = 0,$$

ενώ από τη δεύτερη σχέση παίρνουμε:

$$\vec{s}^T \cdot \nabla (\nabla f(\vec{x}^*)) \cdot \vec{s} \geq 0, \quad \forall \vec{s}$$

Θεώρημα 1. (Αναγκαία συνθήκη πρώτης τάξης)

Έστω μια συνάρτηση $f \in C^1$. Αν ένα σημείο \bar{x}^* δίνει τοπικό ελάχιστο, τότε μία αναγκαία συνθήκη είναι

$$\nabla f(\bar{x}^*) = 0$$

Θεώρημα 2. (Αναγκαία συνθήκη δεύτερης τάξης)

Έστω μια συνάρτηση $f \in C^2$. Αν ένα σημείο \bar{x}^* δίνει τοπικό ελάχιστο, τότε μία αναγκαία συνθήκη είναι

$$H(\bar{x}^*) = \nabla(\nabla f(\bar{x}^*)) \geq 0$$

Θεώρημα 3. (Ικανές συνθήκες δεύτερης τάξης)

Έστω μια συνάρτηση $f \in C^2$. Ένα σημείο \bar{x}^* δίνει τοπικό ελάχιστο, εάν ισχύει η αναγκαία συνθήκη πρώτης τάξης και ο Hessian πίνακας είναι θετικά ορισμένος, δηλαδή:

$$\nabla f(\bar{x}^*) = 0, \quad \text{και} \quad H(\bar{x}^*) = \nabla(\nabla f(\bar{x}^*)) \succ 0$$

Θεώρημα 4.

Μια διαφορίσιμη ($f \in C^2$) κυρτή συνάρτηση f έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

α) $f(\bar{x}_2) - f(\bar{x}_1) \geq \nabla^T f(\bar{x}_1) \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x}_1), \quad \forall \bar{x}_1, \bar{x}_2$

β) Ο Hessian πίνακας είναι θετικά ορισμένος (ή ημιορισμένος) για κάθε \bar{x} , αν η $f(\bar{x})$ είναι αυστηρά κυρτή (ή κυρτή), δηλαδή:

$$\bar{s}^T \cdot \nabla(\nabla f(\bar{x})) \cdot \bar{s} > 0, \quad \forall \bar{s} \neq \vec{0}$$

$$\bar{s}^T \cdot \nabla(\nabla f(\bar{x})) \cdot \bar{s} \geq 0, \quad \forall \bar{s}$$

8.3. ΜΟΡΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κάθε αλγόριθμος αρχίζει από μία αρχική προσέγγιση \bar{x}_0 του ελαχίστου της συνάρτησης $f(\bar{x})$, το οποίο επιτυγχάνεται στο σημείο \bar{x}^* . Στη συνέχεια παράγεται μια ακολουθία σημείων $\{\bar{x}_k\}$, $k=1,2,\dots$, η οποία καθώς το $k \rightarrow \infty$ συγκλίνει στο \bar{x}^* . Συνήθως ψάχνουμε κατά μήκος ενός μονοπατιού, ξεκινώντας από το τρέχον σημείο \bar{x}_0 , δηλαδή κατά μήκος μιας ευθείας στο χώρο που μεταβάλλεται η συνάρτηση f . Έτσι ο

αλγόριθμος παρουσιάζει τα εξής βήματα:

α) Εκκίνηση από μία αρχική προσέγγιση \bar{x}_0 .

β) Στην k επανάληψη το τρέχον σημείο είναι το \bar{x}_k .

γ) Κατασκευάζουμε μία καμπύλη $Q_k(\lambda_k)$ με μεταβλητή την λ_k και με τις εξής ιδιότητες:

- Το \bar{x}_k προκύπτει σαν τιμή της $Q_k(\lambda_k)$ για $\lambda_k=0$
- Για λ_k θετικό και αρκετά μικρό να ισχύει $f(Q_k(\lambda_k)) \leq f(\bar{x}_k)$.

Συνήθως η καμπύλη $Q_k(\lambda_k)$ είναι μια ευθεία $\bar{x} = \bar{x}_k + \lambda_k \bar{s}_k$, όπου το \bar{s}_k είναι ένα διάνυσμα $n \times 1$, το οποίο καθορίζει τη διεύθυνση έρευνας

δ) Χρησιμοποιείται κατάλληλη διαδικασία επιλογής του βήματος (Step size procedure, Line Search), για τον καθορισμό του λ_k επάνω στην ευθεία μετακίνησης

ε) Τίθεται $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k$

στ) Ελέγχεται κάποιο κριτήριο σύγκλισης και επαναλαμβάνεται η διαδικασία αν δεν ισχύει το κριτήριο σύγκλισης

8.3.1. ΜΕΡΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΒΗΜΑΤΟΣ λ_k

Δίνεται ένα σημείο \bar{x}_k και μία διεύθυνση \bar{s}_k . Το κατάλληλο λ_k που θα χρησιμοποιηθεί για να μεταβεί κανείς στο επόμενο σημείο \bar{x}_{k+1} προκύπτει από τη λύση του :

$$\underset{\lambda_k \geq 0}{\text{Minimize}} f(\bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k).$$

Το κατάλληλο λ_k είναι αυτό που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f(\bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k)$ του λ_k , για συγκεκριμένα \bar{x}_k, \bar{s}_k . Συνήθως χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες διαδικασίες:

SSP I. Θέτει ως τιμή του λ_k ένα τοπικό ελάχιστο για το παραπάνω πρόβλημα.

SSP II. Θέτει ως τιμή του λ_k ένα σφαιρικό ελάχιστο για το παραπάνω πρόβλημα.

SSP III. Θέτει ως τιμή του λ_k ένα οποιοδήποτε τοπικό ελάχιστο για το παραπάνω πρόβλημα, το οποίο να διασφαλίζει ότι θα ισχύει:

$$f(\bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k) \leq f(\bar{x}_k).$$

Ο εντοπισμός του βήματος λ_k που ελαχιστοποιεί την $f(\bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k)$ μπορεί να γίνει με αναλυτική μέθοδο (εφόσον γίνεται), ή με αριθμητική μέθοδο. Οι τρεις παραπάνω διαδικασίες επίλυσης του τεθέντος προβλήματος καλούνται **βέλτιστες διαδικασίες επιλογής βήματος (Optimal Step Size Procedures, OSSP)**.

8.4. ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ

Εάν αναπτύξουμε μια συνάρτηση $f(\bar{x})$ στο σημείο \bar{x}_k σύμφωνα με το τύπο του Taylor και πάρουμε παραγώγους μέχρι δευτέρας τάξης προκύπτει:

$$f(\bar{x}) \approx f(\bar{x}_k) + \nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot (\bar{x} - \bar{x}_k) + \frac{1}{2} (\bar{x} - \bar{x}_k)^T \cdot \nabla (\nabla f(\bar{x}_k)) \cdot (\bar{x} - \bar{x}_k), \quad [8:8]$$

Ελαχιστοποιούμε κατά μήκος μιας διεύθυνσης \bar{s}_k , οπότε σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο ελαχιστοποίησης έχουμε:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k \Rightarrow \lambda \bar{s}_k = \bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k. \quad [8:9]$$

Θέτοντας στην παραπάνω σχέση που εκφράζει το ανάπτυγμα Taylor, με αντικατάσταση $\bar{x} = \bar{x}_{k+1}$ και $\lambda \bar{s}_k = \bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k$ παίρνουμε τη σχέση:

$$f(\bar{x}_{k+1}) \approx f(\bar{x}_k) + \nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \lambda_k \bar{s}_k + \frac{1}{2} \lambda_k \bar{s}_k^T \cdot \nabla (\nabla f(\bar{x}_k)) \cdot \lambda_k \bar{s}_k,$$

Παραγωγίζουμε τη σχέση αυτή ως προς λ_k και παίρνουμε:

$$\frac{df(\bar{x}_{k+1})}{d\lambda_k} \approx \nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k + \bar{s}_k^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \lambda_k \bar{s}_k = 0, \quad [8:10]$$

Αν λύσουμε τώρα ως προς λ_k παίρνουμε:

$$\lambda_k = - \frac{\nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k}. \quad [8:11]$$

Η σχέση αυτή παρέχει το μήκος του βήματος για την εύρεση του επόμενου σημείου στο γενικό αλγόριθμο, όταν η συνάρτηση είναι τετραγωνική μορφή ή προσεγγίζεται από μία τετραγωνική μορφή.

Η τετραγωνική μορφή στη γενική περίπτωση της γράφεται ως εξής:

$$f(\bar{x}) = a + \bar{x}^T \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \bar{x}^T \cdot H \cdot \bar{x} \quad [8:12]$$

η οποία με παραγωγήσις δίνει την κλίση:

$$\nabla f(\bar{x}) = \bar{b} + H \cdot \bar{x} \quad \Rightarrow \nabla f(\bar{x}_k) = \bar{b} + H \cdot \bar{x}_k \quad [8:13]$$

Αντικαθιστούμε τη τελευταία αυτή σχέση καθώς και την $\lambda \bar{s}_k = \bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k$ στη σχέση της παραγωγίσις και παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \frac{df(\bar{x}_{k+1})}{d\lambda_k} &\approx \nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k + \bar{s}_k^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \lambda_k \bar{s}_k = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \bar{s}_k^T (\bar{b} + H \cdot \bar{x}_k) + \bar{s}_k^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot (\bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k) = 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \bar{s}_k^T \bar{b} + \bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{x}_k + \bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{x}_{k+1} - \bar{s}_k^T \cdot H \bar{x}_k = 0$$

ή τελικά:

$$\bar{s}_k^T (\bar{b} + H \cdot \bar{x}_{k+1}) = \bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_{k+1}) = 0 \quad [8:14]$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνεται ότι **η κλίση στην επόμενη προσέγγιση $\bar{x} = \bar{x}_{k+1}$ είναι κάθετη στην προηγούμενη διεύθυνση ελαχιστοποίησης \bar{s}_k με την οποία εντοπίστηκε.**

8.5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα η κλίση (gradient) μιας αντικειμενικής συνάρτησης $f(\bar{x})$ στο σημείο \bar{x}_0 αποτελεί ένα διάνυσμα κάθετο στην καμπύλη της επιφάνειας $f(\bar{x})$ που περνάει από το σημείο \bar{x}_0 και ορίζει τη διεύθυνση της μέγιστης τοπικής αύξησης της $f(\bar{x})$ στο σημείο αυτό (**steepest ascent direction**). Η αντίθετη διεύθυνση ορίζει τη διεύθυνση της μέγιστης τοπικής μείωσης (**steepest descent direction**). Η μέθοδος της μεγαλύτερης αλλαγής ή μέθοδος της μέγιστης πτώσης ονομάζεται και μέθοδος του Cauchy.

Για την κατανόηση της μεθόδου αυτής θεωρούμε μία συνάρτηση $f(\bar{x})$ και μία προσέγγισή της στο σημείο \bar{x}_k , γνωρίζοντας ότι το βέλτιστο σημείο είναι το \bar{x}^* . Μία καλύτερη προσέγγιση αναζητείται στην κατεύθυνση $-\nabla f(\bar{x}_k)$. Κατ' αρχήν αδιαστατοποιούμε το παραπάνω διάνυσμα διαιρώντας το με το μέτρο του και παίρνουμε:

$$-\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|} \quad [8:15]$$

Ως διεύθυνση μετάβασης στο επόμενο σημείο ορίζουμε την ακόλουθη:

$$\bar{s}_k = -\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}. \quad [8:16]$$

Το επόμενο σημείο δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \lambda_k \bar{s}_k = \bar{x}_k + \lambda_k \left(-\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|} \right) = \bar{x}_k - \lambda_k \frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}. \quad [8:18]$$

Για τον προσδιορισμό του βήματος λ_k συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος OSSP I, δηλαδή παραγωγίζεται η συνάρτηση $f(\bar{x})$ ως προς λ_k και η παράγωγος εξισούται με μηδέν:

$$\frac{df(\bar{x}_k + \lambda_k \bar{s}_k)}{d\lambda_k} = \frac{df\left(\bar{x}_k - \lambda_k \frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}\right)}{d\lambda_k} = 0. \quad [8:19]$$

Αποδεικνύεται ότι η μέθοδος αυτή συγκλίνει στην λύση της $f(\bar{x}^*)$, καθώς $k \rightarrow \infty$, εφόσον η συνάρτηση αυτή είναι κυρτή και υπάρχει η παράγωγος μέχρι τρίτης τάξης.

Για την περίπτωση συνάρτησης τετραγωνικής μορφής (ή εάν προσεγγίζεται από μία τέτοιας μορφής) το μήκος του βήματος δίνεται από τη Εξίσωση 8:11 που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 8.4 Τετραγωνικές μορφές:

$$\lambda_k = -\frac{\nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k}.$$

Αλλά είχαμε εισαγάγει ως κλίση την ακόλουθη (8:16):

$$\bar{s}_k = -\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}.$$

Με αντικατάστασή της (8:16) στην παραπάνω σχέση λαμβάνεται η ακόλουθη:

$$\lambda_k = -\frac{\nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \left(-\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}\right)}{\left(-\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}\right)^T \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \left(-\frac{\nabla f(\bar{x}_k)}{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|}\right)} \quad [8:20]$$

ή τελικά

$$\lambda_k = -\frac{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|^3}{\nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot H(\bar{x}_k) \cdot \nabla f(\bar{x}_k)} \quad [8:21]$$

Επομένως για την περίπτωση τετραγωνικής μορφής χρησιμοποιείται ως μήκος βήματος η παραπάνω έκφραση, πλην όμως όπως διαπιστώνει κανείς χρειάζεται και ο υπολογισμός του Hessian πίνακα.

8.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΖΥΓΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα τα οποία προκύπτουν αν εφαρμοσθεί μια μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίζεται σε τετραγωνική προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης αντί σε γραμμική. Ένας ακόμα σημαντικός λόγος εφαρμογής τέτοιων μοντέλων, είναι ότι σε συνδυασμό με κάποιες ακόμα ιδιότητες που περιγράφονται στην παράγραφο αυτή, μπορούν να βοηθήσουν στην κατασκευή μεθόδων οι οποίες έχουν την ιδιότητα του **τετραγωνικού τερματισμού**. Δίνουμε τον ακόλουθο ορισμό:

Ορισμός 7.

Μια μέθοδος έχει την ιδιότητα του **τετραγωνικού τερματισμού** όταν εντοπίζει (συγκλίνει) το βέλτιστο σημείο x^* μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης σε γνωστό πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων.

Η παραπάνω σημαντικότερη ιδιότητα επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των συζυγών διευθύνσεων και μάλιστα οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται επαναληπτικά και σε μη τετραγωνικές μορφές. Δίδεται αρχικά ο ορισμός των συζυγών διανυσμάτων:

Ορισμός 8.

Ένα σύνολο n γραμμικώς ανεξαρτήτων μη μηδενικών διανυσμάτων $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_n$ είναι συζυγή ως προς ένα θετικά ορισμένο πίνακα \mathbf{H} (Hessian) αν

$$\bar{s}_i \cdot \mathbf{H} \cdot \bar{s}_j = 0, \quad \text{για κάθε } 1 \leq i \neq j \leq n \quad [8:22]$$

Η χρήση του συμβόλου \mathbf{H} για τον θετικά ορισμένο πίνακα στον προηγούμενο ορισμό 8, δεν είναι καθόλου τυχαία και έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο Hessian πίνακας των αντικειμενικών συναρτήσεων που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια θα παίξει το ρόλο αυτό. Ακόμα, μπορούμε να απαιτήσουμε τα διανύσματα του Ορισμού 8 να είναι μοναδιαία, ή μπορούν να κανονικοποιηθούν, διαιρώντας με το μέτρο τους. Η σχέση της συζυγίας είναι ανάλογη της σχέσης της καθετότητας. Αν τεθεί $\mathbf{H} = \mathbf{I}$ (\mathbf{I} =ο μοναδιαίος πίνακας) τότε η Εξίσωση 8:22 γίνεται η συνθήκη της καθετότητας. Η χρησιμότητα της έννοιας των συζυγών διευθύνσεων έγκειται στο ότι βοηθούν στην κατασκευή μεθόδων με την ιδιότητα του τετραγωνικού τερματισμού και επίσης οδηγούν σε μια ομάδα πολυδιάστατων μεθόδων που χρησιμοποιούν μόνο παραγώγους πρώτης τάξης.

Ορισμός 9.

Μια μέθοδος βελτιστοποίησης ονομάζεται **μέθοδος συζυγών διευθύνσεων** αν κατά την εφαρμογή της παράγει συζυγείς διευθύνσεις και εφαρμοζόμενη σε μια τετραγωνική μορφή με Hessian πίνακα **H** έχει την ιδιότητα του τετραγωνικού τερματισμού.

Δηλαδή μπορεί να αποδειχθεί το ακόλουθο:

Θεώρημα 5

Σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση που είναι τετραγωνική μορφή στον \mathbb{R}^n και έχει ένα ελάχιστο, αν ακολουθήσουμε μια μέθοδο που παράγει διευθύνσεις που είναι συζυγείς ως προς τον Hessian πίνακα της συνάρτησης, το ελάχιστο θα εντοπιστεί σε **n** το πολύ βήματα ένα για κάθε συζυγή διεύθυνση.

Πριν προχωρήσουμε στην απόδειξη του Θεωρήματος 5 αποδεικνύουμε το ακόλουθο Λήμμα:

Λήμμα 1

Δίνεται μια τετραγωνική μορφή $f(\bar{x}) = a + \bar{x}^T \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \bar{x}^T \cdot H \cdot \bar{x}$ και $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_{n-1}$

συζυγείς διευθύνσεις ως προς τον θετικά ορισμένο Hessian πίνακα **H**. Τότε ισχύει ότι:

$$H^{-1} = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\bar{s}_j \bar{s}_j^T}{\bar{s}_j^T \cdot H \cdot \bar{s}_j}$$

Απόδειξη

Έστω ο πίνακας $\sum_{j=0}^{n-1} (\bar{s}_j^T \cdot H \cdot \bar{s}_j)^{-1} \bar{s}_j \bar{s}_j^T$. Αν τον πολλαπλασιάσουμε από δεξιά με $H \cdot \bar{s}_k$

όπου \bar{s}_k μία τυχαία διεύθυνση μεταξύ των $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_{n-1}$ θα πάρουμε

$\sum_{j=0}^{n-1} (\bar{s}_j^T \cdot H \cdot \bar{s}_j)^{-1} \bar{s}_j \bar{s}_j^T (H \cdot \bar{s}_k)$. Επειδή όμως τα $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_{n-1}$ είναι συζυγή ως προς τον

πίνακα **H**, θα έχουμε ότι: $\bar{s}_j \cdot H \cdot \bar{s}_k = 0$, για κάθε $1 \leq j \neq k \leq n$

Συνεπώς προκύπτει ότι:

$$\sum_{j=0}^{n-1} (\bar{s}_j^T \cdot H \cdot \bar{s}_j)^{-1} (\bar{s}_j \bar{s}_j^T) (H \cdot \bar{s}_k) = (\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k)^{-1} \bar{s}_k (\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k) = \bar{s}_k$$

202 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΖΥΓΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ

Άρα η δοθείσα παράσταση $\sum_{j=0}^{n-1} \frac{\bar{s}_j \bar{s}_j^T}{\bar{s}_j^T \cdot H \cdot \bar{s}_j}$ αν πολλαπλασιαστεί από δεξιά με $H \cdot \bar{s}_k$ δίνει

\bar{s}_k . Αν πολλαπλασιαστεί από αριστερά με $\bar{s}_k^T \cdot H$ θα δώσει \bar{s}_k^T . Άρα είναι ο αντίστροφος πίνακας του H.

Δίνουμε τώρα την απόδειξη του Θεωρήματος 5.

Απόδειξη Θεωρήματος 5:

Έστω ότι η τετραγωνική αντικειμενική συνάρτηση δίδεται από τη Εξίσωση 8:12:

$$f(\bar{x}) = a + \bar{x}^T \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \bar{x}^T \cdot H \cdot \bar{x}$$

Αν ληφθεί η κλίση της έχουμε ότι:

$$\nabla f(\bar{x}) = \bar{b} + H \cdot \bar{x} \quad [8:23]$$

Ακόμα, για το βέλτιστο σημείο \bar{x}^* θα ισχύει ότι $\nabla f(\bar{x}^*) = 0$.

Επομένως, από την Εξίσωση 8:23 έχουμε ότι:

$$\bar{x}^* = -H^{-1} \cdot \bar{b} \quad [8:24]$$

Αρκεί να δείξουμε ότι ακολουθώντας συζυγείς κατευθύνσεις ελαχιστοποίησης, σε n βήματα φθάνουμε στο \bar{x}^* που δίδεται από την Εξίσωση 8:24. Δηλαδή ότι η n -οστή προσέγγιση είναι $\bar{x}_n = \bar{x}^*$.

Έστω $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_{n-1}$ σύνολο συζυγών ως προς τον Hessian πίνακα διευθύνσεων, οι οποίες παράγονται με κάποια μέθοδο, δηλαδή ισχύει η Εξίσωση 8:22 για $0 \leq i \neq j \leq n-1$.

Από τον Γενικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης έχουμε ότι. $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \lambda \bar{s}_k$ Αν αντικαταστήσουμε προς τα πίσω τις διαδοχικές προσεγγίσεις στη σχέση αυτή, θα καταλήξουμε στην ακόλουθη:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_0 + \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k \bar{s}_k \quad [8:25]$$

Όμως σε κάθε επανάληψη, επειδή είναι τετραγωνική μορφή, το μέγεθος του βήματος λ_k δίνεται από την Εξίσωση 8:11:

$$\lambda_k = -\frac{\nabla f(\bar{x}_k) \cdot \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \quad [8:26]$$

Αν την αντικαταστήσουμε στην Εξίσωση 8:25 θα πάρουμε:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_k)}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \right\} \bar{s}_k \quad [8:27]$$

Είναι όμως $\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_k) = \bar{s}_k^T \cdot (H \cdot \bar{x}_k + \bar{b})$ και αντικαθιστώντας από την Εξίσωση 8:27 το \bar{x}_k προκύπτει:

$$\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_k) = \bar{s}_k^T \cdot \left\{ H \cdot \bar{x}_0 + H \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \lambda_i \bar{s}_i + \bar{b} \right\}$$

Από την αρχική υπόθεση ισχύει $\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_i = 0$ για $i = 0, 1, \dots, k-1$, συνεπώς η προηγούμενη σχέση δίνει την ακόλουθη:

$$\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_k) = \bar{s}_k^T \cdot \{ H \cdot \bar{x}_0 + \bar{b} \}$$

την οποία αν την αντικαταστήσουμε στην Εξίσωση 8:27 θα πάρουμε:

$$\begin{aligned} \bar{x}_n &= \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k^T \cdot (H \cdot \bar{x}_0 + \bar{b}) \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \right\} \quad \text{ή} \\ \bar{x}_n &= \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{x}_0 \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \right\} - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k^T \cdot \bar{b} \bar{s}_k}{\bar{s}_k^T \cdot H \bar{s}_k} \right\} = \\ \bar{x}_n &= \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k (\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{x}_0)}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \right\} - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{\bar{s}_k (\bar{s}_k^T \cdot \bar{b})}{\bar{s}_k^T \cdot H \bar{s}_k} \right\} = \\ \bar{x}_n &= \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{(\bar{s}_k \cdot \bar{s}_k^T)}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k} \right\} H \cdot \bar{x}_0 - \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{(\bar{s}_k \cdot \bar{s}_k^T)}{\bar{s}_k^T \cdot H \bar{s}_k} \right\} \bar{b} \end{aligned} \quad [8:28]$$

Από το Λήμμα 1 είναι αληθές ότι $H^{-1} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\bar{s}_k \bar{s}_k^T}{\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_k}$. Άρα σε συνδυασμό με την Εξίσωση

8:28 θα πάρουμε ότι:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_0 - H^{-1}(H\bar{x}_0) - H^{-1}\bar{b}$$

οπότε είναι πλέον φανερό ότι:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_0 - \bar{x}_0 - H^{-1}\bar{b} = -H^{-1}\bar{b} = \bar{x}^*$$

που είναι η ζητούμενη σχέση.

Στην παράγραφο 8.4, αποδείξαμε ότι αν εφαρμόζουμε μία OSSP διαδικασία για την εύρεση ενός ελαχίστου μίας τετραγωνικής μορφής, τότε αν \bar{x}_k είναι η τρέχουσα προσέγγιση του βέλτιστου σημείου, η κλίση στην επόμενη προσέγγιση \bar{x}_{k+1} είναι κάθετη στη διεύθυνση ελαχιστοποίησης με την οποία βρέθηκε η προσέγγιση αυτή, δηλαδή:

$$\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_{k+1}) = 0 \quad [8:29]$$

Στη συνέχεια αποδεικνύουμε ότι αν κατά τη μέθοδο που εφαρμόζουμε οι διευθύνσεις που παράγονται είναι συζυγείς, τότε η ιδιότητα (8:29) επεκτείνεται στην ακόλουθη:

Θεώρημα 6

Αν $f(\bar{x})$ είναι τετραγωνική μορφή, και $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_k$ σύνολο συζυγών ως προς τον Hessian πίνακα διευθύνσεων, οι οποίες παράγονται με κάποια μέθοδο, μέχρι την προσέγγιση x_{k+1} , τότε:

$$\nabla^T f(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{s}_j = 0 \quad \text{για } j = 1, 2, \dots, k \quad [8:30]$$

Απόδειξη:

$$\text{Είναι } \nabla^T f(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{s}_j = \nabla^T f(\bar{x}_{j+1}) \cdot \bar{s}_j + \sum_{i=j+1}^k \{ \nabla^T f(\bar{x}_{i+1}) - \nabla^T f(\bar{x}_i) \} \cdot \bar{s}_j.$$

Από την Εξίσωση 8:23 όμως έχουμε ότι:

$$\nabla^T f(\bar{x}_{i+1}) - \nabla^T f(\bar{x}_i) = \{ \bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i \}^T \cdot H$$

οπότε η προηγούμενη γίνεται:

$$\nabla^T f(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{s}_j = \nabla^T f(\bar{x}_{j+1}) \cdot \bar{s}_j + \sum_{i=j+1}^k \{ \bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i \}^T \cdot H \cdot \bar{s}_j \quad [8:31]$$

Όμως, από το γενικό αλγόριθμο ξέρουμε ότι:

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i + \lambda_i \bar{s}_i \Rightarrow \bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i = \lambda_i \bar{s}_i$$

Αντικαθιστούμε στην Εξίσωση 8:31 και παίρνουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\nabla^T f(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{s}_j = \nabla^T f(\bar{x}_{j+1}) \cdot \bar{s}_j + \sum_{i=j+1}^k \lambda_i \bar{s}_i^T \cdot H \cdot \bar{s}_j \quad [8:32]$$

Λόγω όμως της συζυγίας, ισχύει ότι $\bar{s}_k^T \cdot H \cdot \bar{s}_j = 0$ για $i = j+1, \dots, k$. Έτσι στη (8.32) το άθροισμα εξαφανίζεται. Ακόμα, λόγω της Εξίσωσης 8:30 θα ισχύει $\nabla^T f(\bar{x}_{j+1}) \cdot \bar{s}_j = 0$.

Άρα, η Εξίσωση 8:32 είναι:

$$\nabla^T f(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{s}_j = 0 + 0 \quad \text{για τυχαίο } 1 \leq j \leq k \text{ που είναι η ζητούμενη σχέση (8:30).}$$

Η κλίση σε κάθε προσέγγιση $\nabla^T f(\bar{x}_{k+1})$ είναι κάθετη σε κάθε συζυγή διεύθυνση.

Χρήσιμες ιδιότητες

Δίνουμε τώρα μερικές ενδιαφέρουσες χρήσιμες ιδιότητες για ότι θα ακολουθήσει.

Αν κατά την εφαρμογή μίας μεθόδου που παράγει συζυγείς διευθύνσεις προκύπτουν οι προσεγγίσεις $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots$, ορίζουμε τον πίνακα:

$$X^{(i)} = [(\bar{x}_1 - \bar{x}_0) \ (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \ \dots \ (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1})] = [\Delta \bar{x}_0 \ \Delta \bar{x}_1 \ \dots \ \Delta \bar{x}_{i-1}]$$

τότε αφού ισχύει

$$\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i = \Delta \bar{x}_i = \lambda_i \bar{s}_i$$

παιρνουμε ότι

$$X^{(i)} = [\lambda_0 \bar{s}_0 \ \lambda_1 \bar{s}_1 \ \dots \ \lambda_{i-1} \bar{s}_{i-1}]$$

οπότε:

$$(X^{(i)})^T = \begin{bmatrix} \lambda_0 \bar{s}_0^T \\ \lambda_1 \bar{s}_1^T \\ \vdots \\ \lambda_{i-1} \bar{s}_{i-1}^T \end{bmatrix}$$

Επειδή όμως οι διευθύνσεις $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \dots, \bar{s}_{i-1}$ είναι **συζυγείς**, από την προηγούμενη και το Θεώρημα 6 προκύπτει ότι:

$$(X^{(i)})^T \cdot \nabla f(\bar{x}_i) = 0 \tag{8:33}$$

Ορίζουμε ακόμα τον πίνακα:

$$G^{(i)} = [\{\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0)\} \ \{\nabla f(\bar{x}_2) - \nabla f(\bar{x}_1)\} \ \dots \ \{\nabla f(\bar{x}_i) - \nabla f(\bar{x}_{i-1})\}]$$

και αν συμβολίσουμε με $\Delta \bar{g}_{i-1} = \nabla f(\bar{x}_i) - \nabla f(\bar{x}_{i-1})$ θα πάρουμε:

$$G^{(i)} = [(\nabla \bar{g}_0 \ \nabla \bar{g}_1 \ \dots \ \nabla \bar{g}_{i-1})]$$

Από τον ορισμό του τετραγωνικού μοντέλου στις τετραγωνικές μορφές είναι πολύ εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι:

$$\nabla f(\bar{x}) = \nabla f(\bar{x}_k) + \nabla(\nabla f(\bar{x}_k)) \cdot (\bar{x} - \bar{x}_k)$$

αν δε θέσουμε όπου \bar{x} το \bar{x}_{k+1} θα πάρουμε

$$\nabla f(\bar{x}_{k+1}) - \nabla f(\bar{x}_k) = \nabla(\nabla f(\bar{x}_k)) \cdot (\bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k)$$

και επειδή είναι $\bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k = \lambda_k \bar{s}_k$ προκύπτει ότι

$$\nabla f(\bar{x}_{k+1}) - \nabla f(\bar{x}_k) = \Delta \bar{g}_k = \nabla(\nabla f(\bar{x}_k)) \cdot (\bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k) = H \cdot (\lambda_k \bar{s}_k) \tag{8:34}$$

Από τις σχέσεις (8.33) και (8.34) προκύπτει αμέσως ότι:

$$\left(X^{(i)}\right)^T \left(\nabla f(\bar{x}_{j+1}) - \nabla f(\bar{x}_j)\right) = \left(X^{(i)}\right)^T \Delta \bar{g}_j = 0 \quad \text{για } 0 \leq i < j \leq n-1 \quad [8:35]$$

αλλά και

$$\left(G^{(i)}\right)^T \left(\bar{x}_{j+1} - \bar{x}_j\right) = \left(G^{(i)}\right)^T \Delta \bar{x}_j = 0 \quad \text{για } 0 \leq i < j \leq n-1 \quad [8:36]$$

Με αφορμή το θεώρημα 5 το οποίο συνδέει τις συζυγείς διευθύνσεις με την έννοια του τετραγωνικού προγραμματισμού, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να συνδέσουν τις ιδιότητες αυτές με τη μέθοδο της μέγιστης αλλαγής για να επιτύχουν αλγόριθμους που θα συγκλίνουν σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Οι μέθοδοι που προέκυψαν παράγουν συζυγείς διευθύνσεις και βασίζονται στο τετραγωνικό μοντέλο μιας γενικής συνάρτησης. Ονομάζονται δε γενικώς **Μέθοδοι συζυγών διευθύνσεων**.

Η πιο γνωστή μέθοδος συζυγών διευθύνσεων είναι η **μέθοδος των συζυγών κλίσεων** όπως ονομάζεται, η οποία προτάθηκε αρχικά από τους Hestenes and Stiefel (1952) και Beckman (1960), σαν μέθοδος επίλυσης γραμμικών συστημάτων. Η επίλυση ενός γραμμικού συστήματος $A \cdot \bar{x} = \bar{b}$ είναι ισοδύναμο πρόβλημα με την ελαχιστοποίηση μιας θετικά ορισμένης τετραγωνικής μορφής για αυτό και προέκυψαν διάφορες παραλλαγές της μεθόδου που ασχολούνται με το τελευταίο πρόβλημα. Η γνωστότερη παραλλαγή προτάθηκε από τους Fletcher and Reeves (1964) για αυτό και ονομάζεται επίσης **μέθοδος των Fletcher-Reeves**.

Η μέθοδος αυτή, στο βήμα k παράγει διεύθυνση \bar{s}_k η οποία είναι γραμμικός συνδυασμός της $-\nabla f(\bar{x}_k)$, δηλαδή της διεύθυνσης της μέγιστης αλλαγής στην τρέχουσα προσέγγιση και των προηγούμενων διευθύνσεων $\bar{s}_0, \bar{s}_1, \dots, \bar{s}_k$. Οι συντελεστές του γραμμικού συνδυασμού επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι παραγόμενες διευθύνσεις από προσέγγιση σε προσέγγιση να είναι συζυγείς ως προς τον Hessian πίνακα της αντικειμενικής συνάρτησης.

Τελικά προκύπτει ότι για να υπολογισθούν αυτοί οι συντελεστές χρειάζεται μόνον η τρέχουσα κλίση $\nabla f(\bar{x}_k)$ και η ακριβώς προηγούμενη $\nabla f(\bar{x}_{k-1})$. Η μέθοδος ξεκινά χρησιμοποιώντας μια αρχική προσέγγιση \bar{x}_0 και η πρώτη διεύθυνση ελαχιστοποίησης είναι η διεύθυνση της μεγαλύτερης πτώσης δηλαδή $\bar{s}_0 = -\nabla f(\bar{x}_0)$ κανονικοποιημένη ή όχι. Τότε σύμφωνα με τον γενικό Αλγόριθμο θα είναι:

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_0 + \lambda_0 \bar{s}_0 \quad [8:37]$$

και εντοπίζουμε με Βέλτιστη Διαδικασία Επιλογής Βήματος (Optimal Step Size Procedure, OSSP), την πρώτη προσέγγιση. Στη συνέχεια, σύμφωνα με ό,τι ειπώθηκε παραπάνω, η επόμενη διεύθυνση βρίσκεται από τη σχέση

$$\bar{s}_1 = -\nabla f(\bar{x}_1) + \omega_1 \bar{s}_0 \quad [8:38]$$

αφού θα πρέπει να είναι γραμμικός συνδυασμός της τελευταίας διεύθυνσης μεγαλύτερης αλλαγής, $-\nabla f(\bar{x}_1)$, και όλων των προηγούμενων διευθύνσεων που είναι προς το παρόν μόνο μία, η \bar{s}_0 . Ο αριθμός ω_1 θα επιλεγεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι διευθύνσεις \bar{s}_0, \bar{s}_1 να είναι συζυγείς, δηλαδή να ισχύει $\bar{s}_0^T \cdot H \cdot \bar{s}_1 = 0$.

Από τις Εξισώσεις 8:37 και 8:34, δεδομένου ότι ισχύει $H = H^T$, έχουμε ότι:

$$\bar{s}_0^T = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_0)^T}{\lambda_0} = \frac{(\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0))^T \cdot H^{-1}}{\lambda_0} \quad [8:39]$$

Επειδή θέλουμε να είναι συζυγείς οι \bar{s}_0, \bar{s}_1 , από τις Εξισώσεις 8:39 και 8:38 λαμβάνουμε ότι:

$$\left(\frac{(\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0))^T \cdot H^{-1}}{\lambda_0} \right) \cdot H \cdot (-\nabla f(\bar{x}_1) + \omega_1 \bar{s}_0) = 0$$

Η προηγούμενη σχέση μετά τις πράξεις, για $\bar{s}_0 = -\nabla f(\bar{x}_0)$ και επειδή ισχύει ότι :

$$\bar{s}_k^T \cdot \nabla f(\bar{x}_{k+1}) = 0 = \nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \nabla f(\bar{x}_{k+1}) \text{ για κάθε } k, \quad [8:39a]$$

αφού λύσουμε ως προς ω_1 γίνεται

$$\omega_1 = \frac{\nabla^T f(\bar{x}_1) \cdot \nabla f(\bar{x}_1)}{\nabla^T f(\bar{x}_0) \cdot \nabla f(\bar{x}_0)} \quad [8:40]$$

Η επόμενη διεύθυνση \bar{s}_2 βρίσκεται με τον ίδιο τρόπο, ενώ με το ίδιο σκεπτικό ακολουθούν και οι υπόλοιπες. Οι συντελεστές του γραμμικού συνδυασμού είναι όλοι μηδέν εκτός από τον τελευταίο. Έτσι καταλήγουμε στη σχέση:

$$\omega_k = \frac{\nabla^T f(\bar{x}_k) \cdot \nabla f(\bar{x}_k)}{\nabla^T f(\bar{x}_{k-1}) \cdot \nabla f(\bar{x}_{k-1})} = \frac{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|^2}{\|\nabla f(\bar{x}_{k-1})\|^2} \quad [8:41]$$

ενώ

$$\bar{s}_k = -\nabla f(\bar{x}_k) + \omega_k \bar{s}_{k-1} \quad [8:42]$$

Η μέθοδος όπως την περιγράψαμε παραπάνω είναι μέθοδος συζυγών διευθύνσεων και με βάση το Θεώρημα 5 συγκλίνει σε n ή λιγότερα βήματα εφαρμοζόμενη σε τετραγωνική μορφή. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται καμία αντιστροφή πίνακα σε κάθε βήμα, ενώ χρειάζεται πολύ λίγο χώρο αποθήκευσης

μνήμης όταν τρέχει σε Η/Υ (τρία n -διάστατα διανύσματα). (Γενικά οι μέθοδοι συζυγών διευθύνσεων σε σύγκριση με τις μεθόδους Newton μειονεκτούν, αλλά σε μεγάλα προβλήματα δουλεύουν πολύ καλά). Όταν η συνάρτηση στην οποία εφαρμόζεται δεν είναι τετραγωνική, (που είναι και η πιο πιθανή και χρήσιμη περίπτωση) τότε δεν υπάρχει εγγύηση ότι θα συγκλίνει σε n ή λιγότερα βήματα. Υπάρχουν δύο εκδοχές του αλγορίθμου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι οποίες βεβαίως υπερκαλύπτουν και τις τετραγωνικές μορφές. Είναι η «**Συνεχής**» εκδοχή (Continued version) και η εκδοχή «**Επανεκκίνησης**» (Reset version). Στην πρώτη εκδοχή συνεχίζουμε τις επαναλήψεις κανονικά και μετά το n -οστό βήμα, μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Προφανώς αν είναι τετραγωνική μορφή σταματούμε μόλις φτάσουμε στη n -οστή προσέγγιση, αν δεν έχει ήδη ικανοποιηθεί το κριτήριο της μηδενικής κλίσης σε κάποια ακρίβεια, διότι μετά δεν έχει νόημα (αν δεν έχουν γίνει τραγικά round-off-errors θα έχει βρεθεί το βέλτιστο).

Στη δεύτερη περίπτωση, μετά την εύρεση της n -οστής προσέγγισης ξεκινάμε από την αρχή τον αλγόριθμο από το σημείο που βρισκόμαστε, δηλαδή το \bar{x}_n , χρησιμοποιώντας το ως \bar{x}_0 και λαμβάνοντας σαν επόμενη διεύθυνση όχι τον επόμενο γραμμικό συνδυασμό, αλλά τη διεύθυνση της μεγαλύτερης πτώσης δηλαδή την αντίθετη της κλίσης στο \bar{x}_n . Μετά από άλλα n βήματα επαναλαμβάνουμε την επανεκκίνηση (reset).

Αλγόριθμος Μεθόδου Fletcher-Reeves, συζυγών κλίσεων

Έστω μία πραγματική συνάρτηση $f \in C^1$ στο $E \subseteq \mathfrak{R}^n$. Για την εύρεση ενός βέλτιστου σημείου \bar{x}^* που δίνει τοπικό ελάχιστο στο E , επιλέγουμε μια αρχική προσέγγιση \bar{x}_0 και δημιουργούμε μια ακολουθία σημείων $\{\bar{x}_k\}$ η οποία συγκλίνει σ' αυτό με την εξής διαδικασία:

Βήμα 1: Υπολογίζουμε τη κλίση στο αρχικό σημείο και στη συνέχεια την πρώτη διεύθυνση ελαχιστοποίησης $\bar{s}_0 = -\nabla f(\bar{x}_0)$. Θέτουμε $k = 0$.

Βήμα 2: Υπολογίζουμε το μέγεθος του βήματος λ_k με OSSP δηλαδή από τη λύση του μερικού προβλήματος της παραγράφου 8.3.1. Αν είναι τετραγωνική μορφή από την Εξίσωση 8:11

Βήμα 3: Υπολογίζουμε το επόμενο σημείο, $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \lambda_k \bar{s}_k$.

Θέτουμε $k = k + 1$.

Υπολογίζουμε την επόμενη διεύθυνση από τον τύπο

$$\bar{s}_k = -\nabla f(\bar{x}_k) + \omega_k \bar{s}_{k-1} \text{ όπου } \omega_k = \frac{\|\nabla f(\bar{x}_k)\|^2}{\|\nabla f(\bar{x}_{k-1})\|^2}$$

Βήμα 4: Ελέγχουμε κριτήριο σύγκλισης. Ενδεικτικό κριτήριο, $\|\bar{s}_k\| < \varepsilon$ ή $\|\nabla f(\bar{x}_k)\| < \varepsilon$ όπου ε η ακρίβεια. Αν είναι αληθές τέλος, διαφορετικά συνεχίζουμε.

Βήμα 5: Αν $k < n$ πήγαινε στο Βήμα 2, διαφορετικά συνέχισε.

Βήμα 6: Αν είναι τετραγωνική μορφή πρέπει να είναι η τελευταία προσέγγιση οπότε και το κριτήριο σύγκλισης θα πρέπει να είναι αληθές. Αν δεν είναι τετραγωνική μορφή τότε:

α) Αν εφαρμόζουμε την εκδοχή επανεκκίνησης

Θέσε $\bar{x}_0 = \bar{x}_n$ (= \bar{x}_k η τρέχουσα) και πήγαινε στο Βήμα 1.

β) Αν εφαρμόζουμε την συνεχή εκδοχή πήγαινε στο Βήμα 2.

8.7. ΣΧΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΝΕΡΟΥ

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της Εξίσωσης 8:1 όπως εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων.

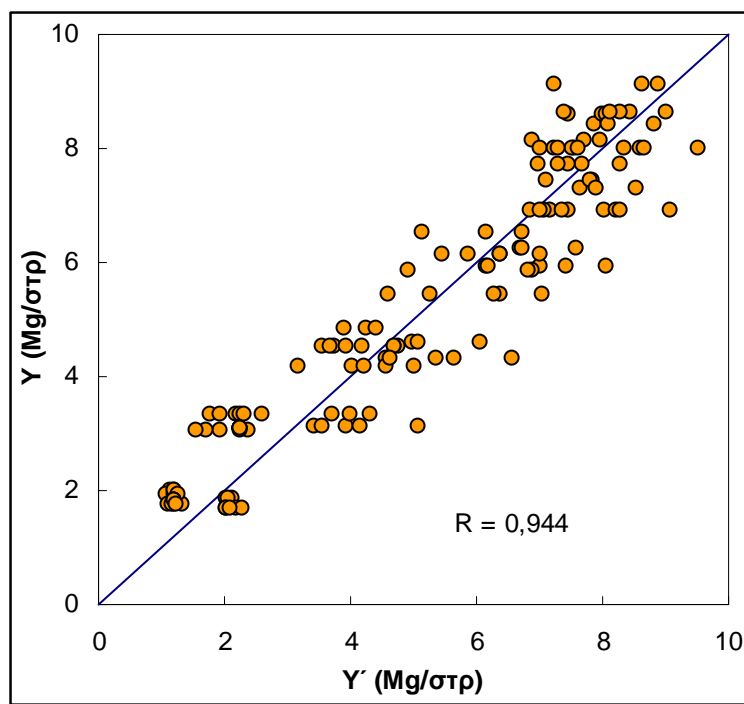
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1. Τιμές παραμέτρων της Εξίσωσης 8:1 και Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE)

Παράμετρος α	Παράμετρος β	Παράμετρος γ	MSE
0,550	0,976	0,529	5,158

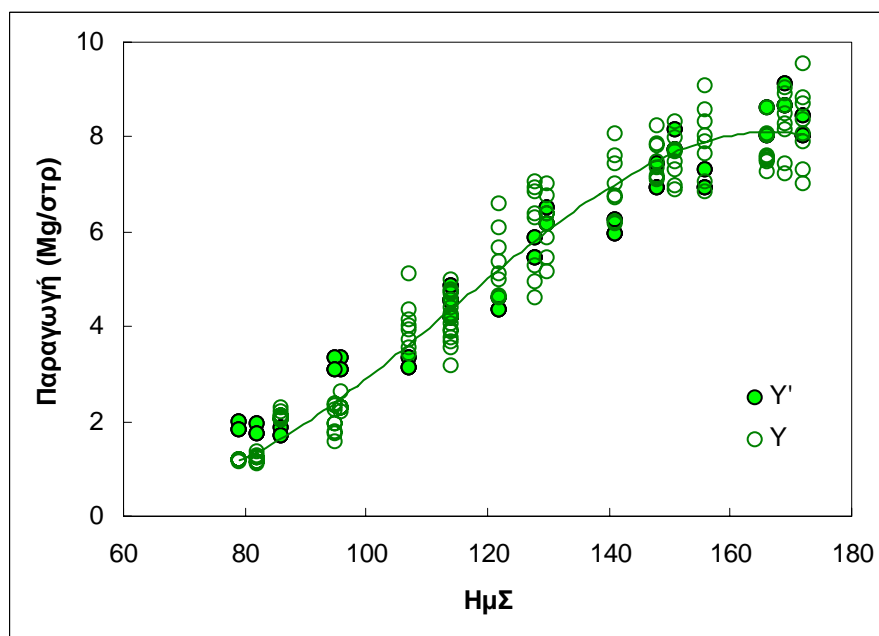
Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζεται η συσχέτιση των μετρημένων και υπολογισμένων με την Εξίσωση 8:1 τιμών της παραγωγής ζαχαροτεύτλων.

Στην Εικόνα 8.2 παρουσιάζονται οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της παραγωγής συναρτήσεως του χρόνου (ημέρες από την σπορά).

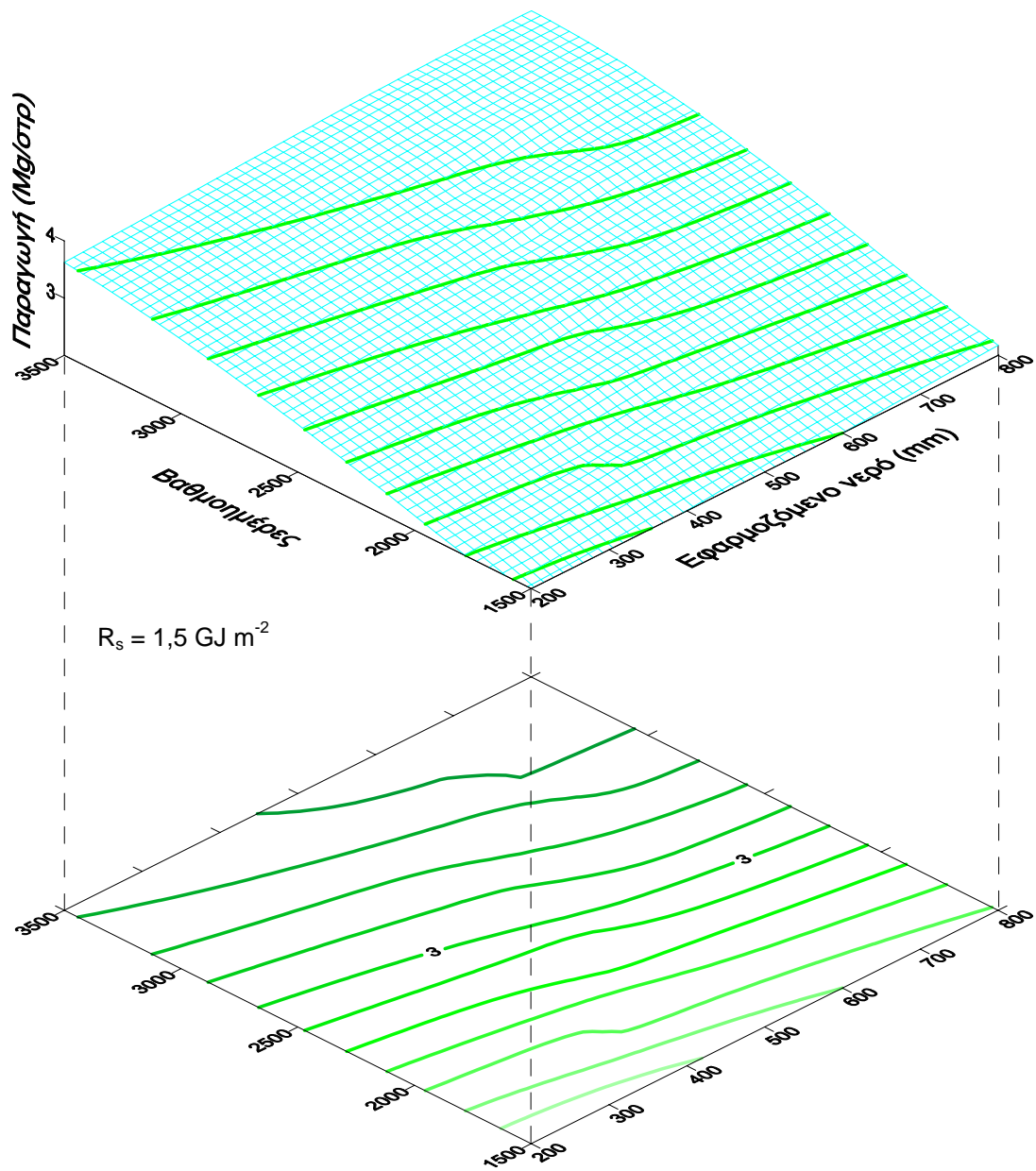
Στις Εικόνες 8.3α έως 8.3στ, δίδεται η μεταβολή (πρόβλεψη) της παραγωγής συναρτήσεως της θερμοκρασίας και του αρδευτικού νερού για έξι επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Σε κάθε διάγραμμα χρησιμοποιήθηκαν τιμές θερμοκρασίας σε βαθμομέρες (Snyder, 1985, Yang et al., 1995) και νερού που εφαρμόσθηκε σε mm για να υπολογισθεί η παραγωγή επί σταθερού επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας, αφού ο εκθέτης (παράμετρος β) αυτής όπως υπολογίσθηκε έχει την μικρότερη επίδραση από τους τρεις.



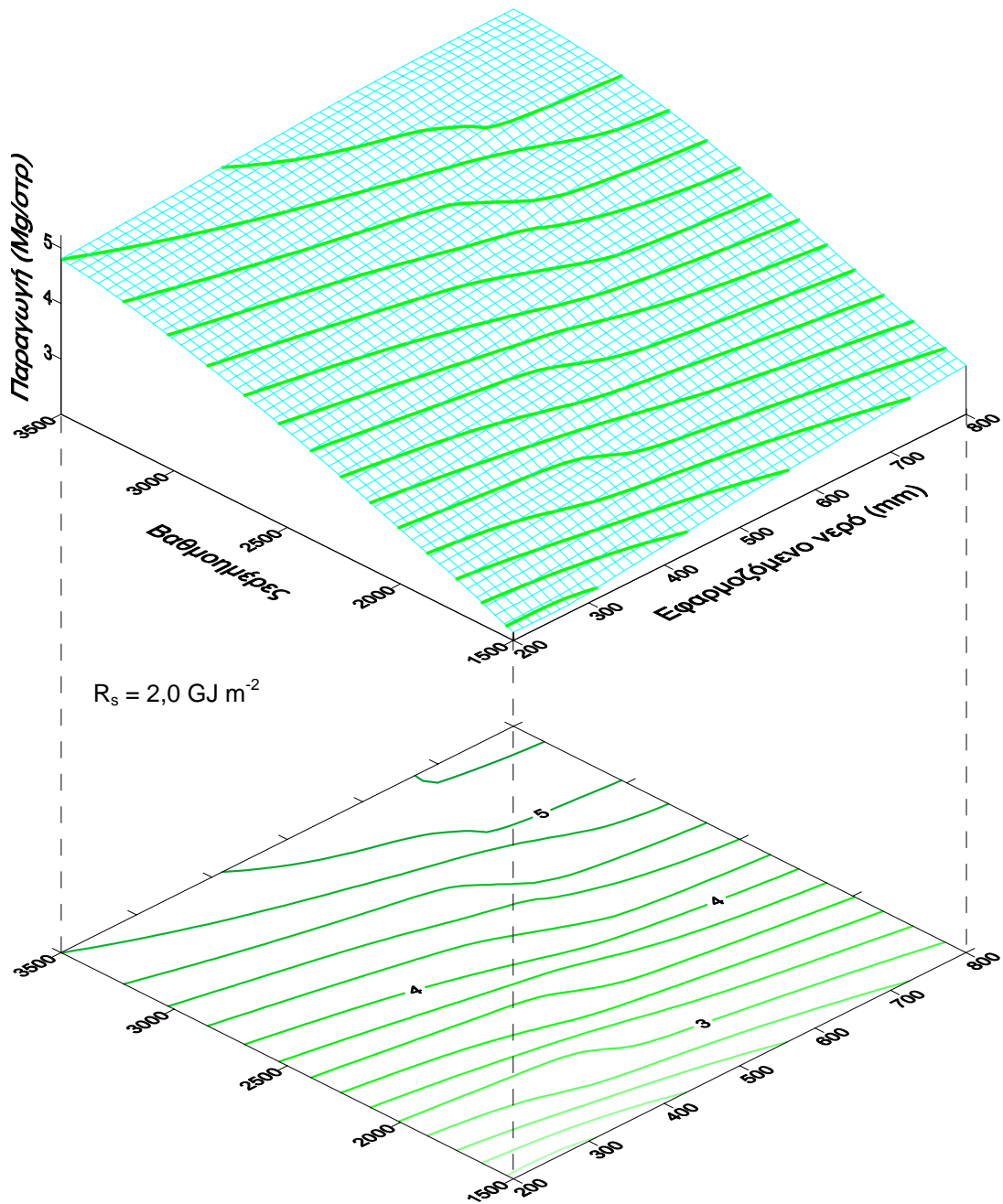
Εικόνα 8.1: Διάγραμμα συσχέτισης μετρημένης (Y) και υπολογισμένης (Y') παραγωγής.



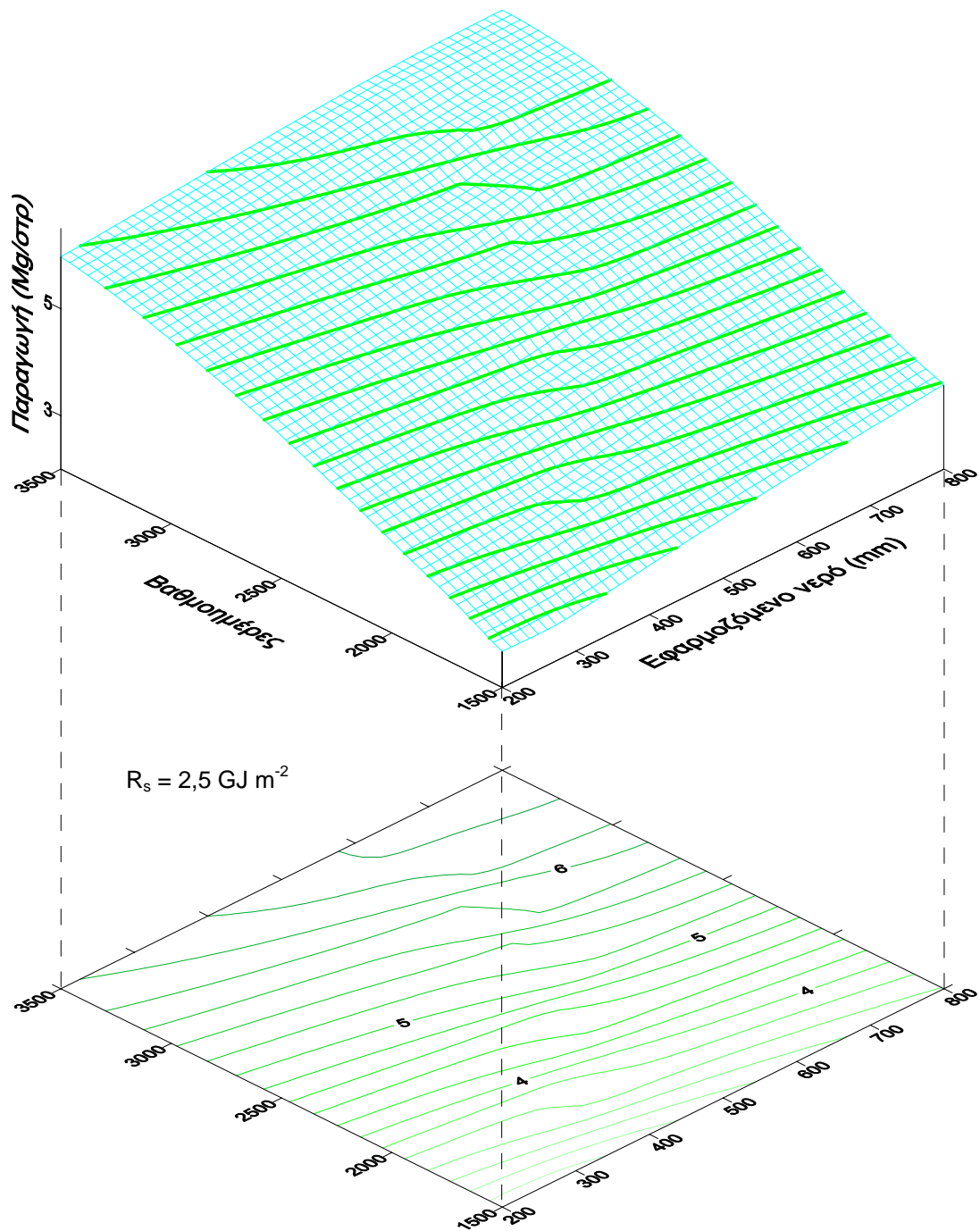
Εικόνα 8.2: Μετρημένες (Y) και υπολογισμένες (Y') με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων τιμές παραγωγής.



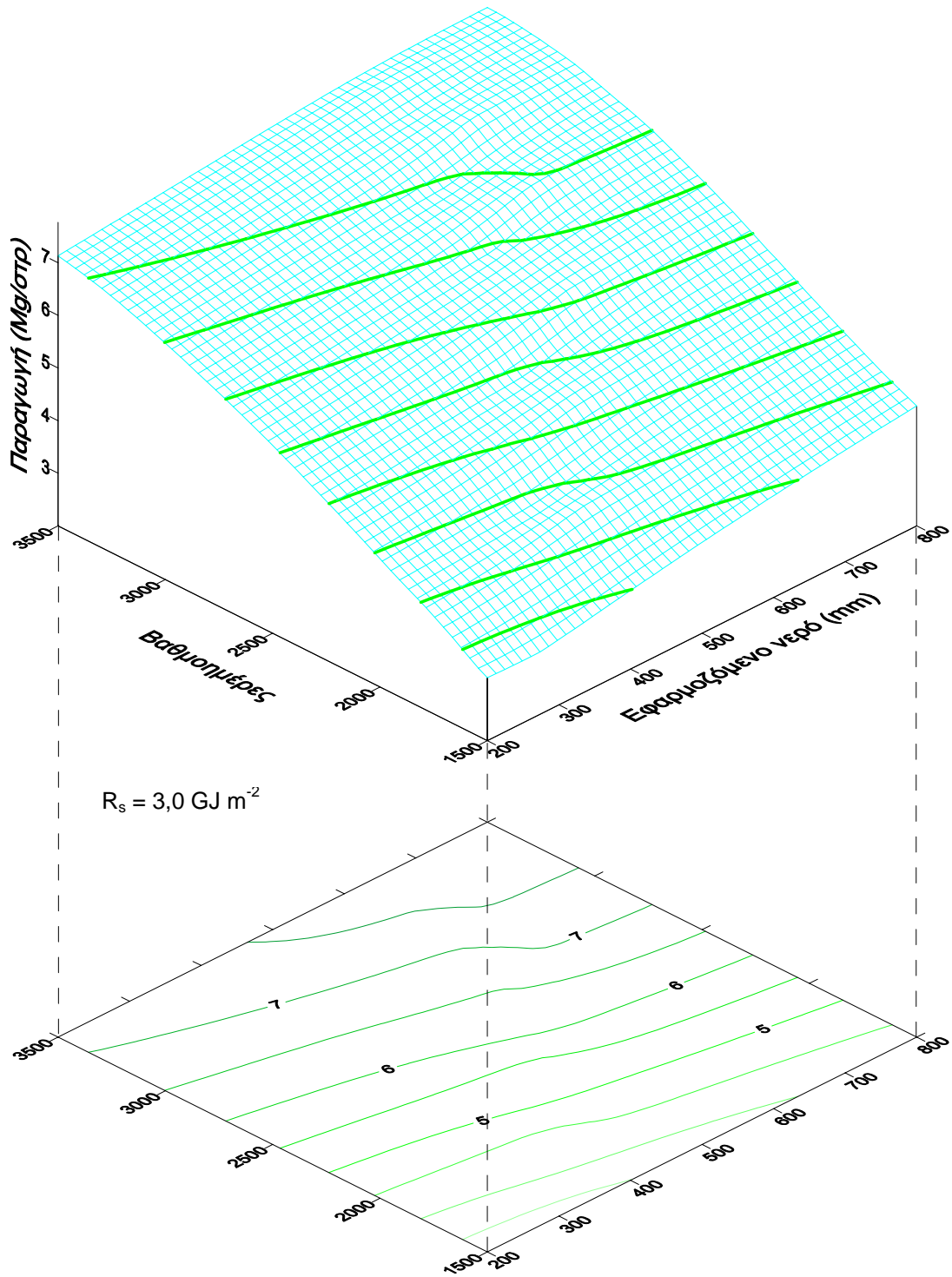
Εικόνα 8.3α: Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $1,5 \text{ GJ m}^{-2}$.



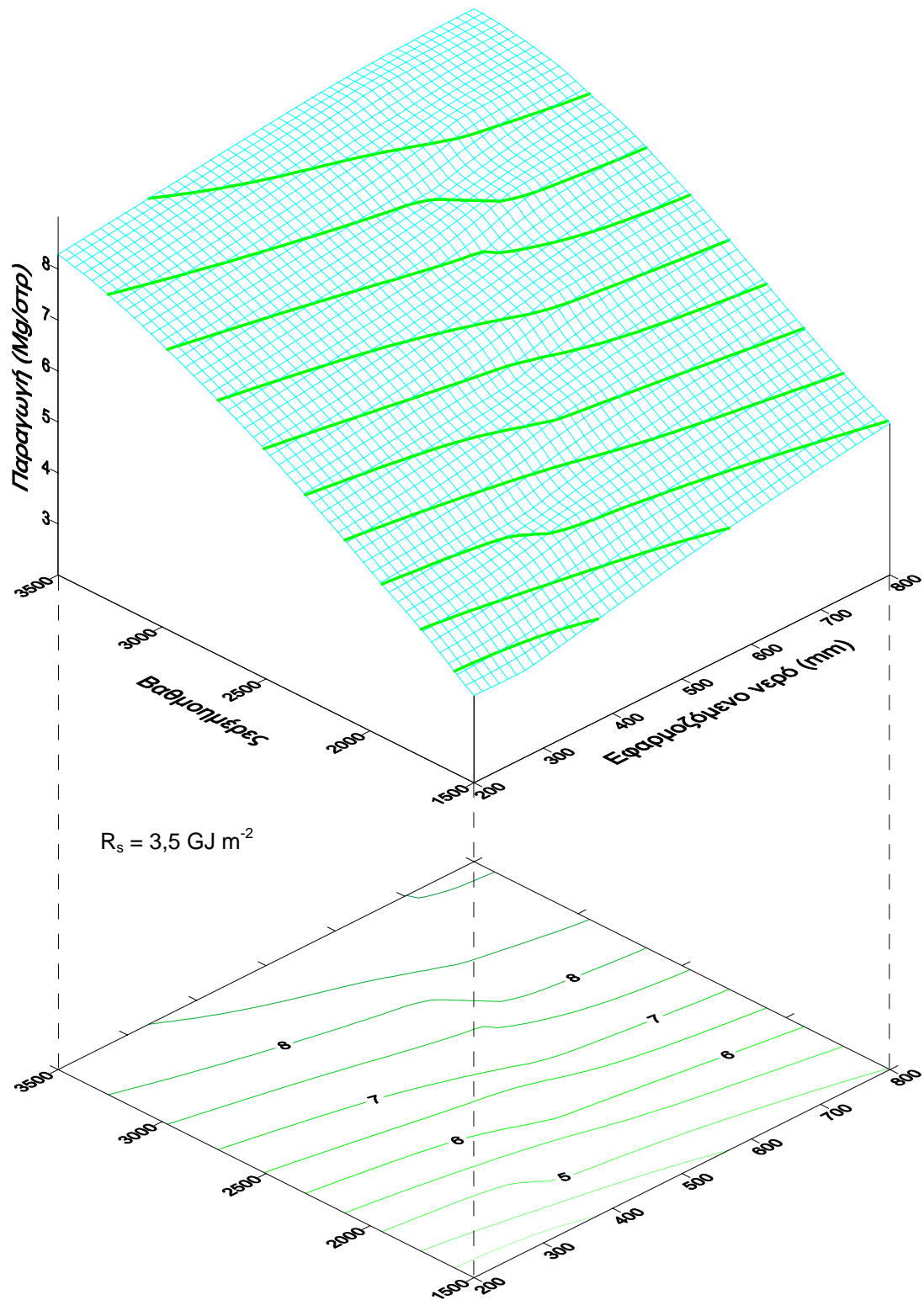
Εικόνα 8.3β: Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $2,0 \text{ GJ m}^{-2}$.



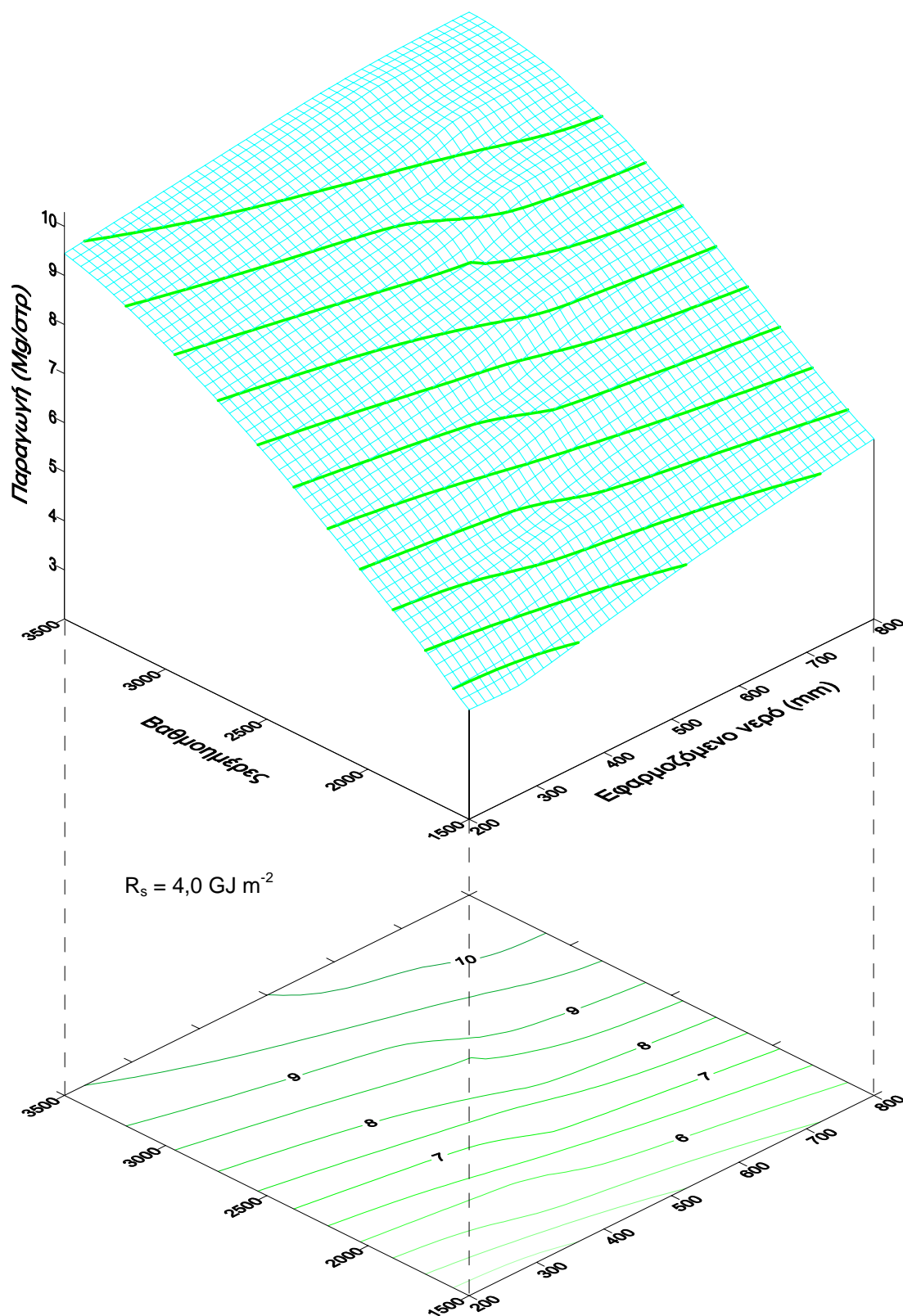
Εικόνα 8.3γ: Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $2,5 \text{ GJ m}^{-2}$.



Εικόνα 8.3δ: Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $3,0 \text{ GJ m}^{-2}$.



Εικόνα 8.3ε: Η μεταβολή της παραγωγής όπως υπολογίσθηκε με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $3,5 \text{ GJ m}^{-2}$.



Εικόνα 8.3στ: Η μεταβολή της παραγωγής σε σχέση με τη θερμοκρασία και το εφαρμοζόμενο νερό για επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας $4,0 \text{ GJ m}^{-2}$.

8.8. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παραγωγικότητα της καλλιέργειας του ζαχαροτεύτλου συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ποσότητα νερού που δέχεται (Dunham, 1993). Ο συνδυασμός των τριών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προσέγγισε καλύτερα την παραγωγικότητα της καλλιέργειας, ενώ η χρησιμοποίηση της θερμοκρασίας με μονάδες βαθμομερών παρήγαγε την καλύτερη σχέση θερμοκρασίας – παραγωγής.

Οι βιομηχανίες ζάχαρης σε διάφορα μέρη το κόσμου έχουν κατά καιρούς λειτουργήσει συστήματα για την εκτίμηση της παραγωγής. Οι βιομηχανίες αξιοποιούν αυτές τις εκτιμήσεις για διάφορους λόγους, όπως για να κάνουν έναν προϋπολογισμό της «καμπάνιας», λαμβάνοντας αποφάσεις για το προσωπικό, την ενέργεια, τα υλικά κ.λπ., που θα χρειαστούν για να διεκπεραιώσουν την «καμπάνια». Ενδείξεις για μεγάλες παραγωγές οδηγούν σε αποφάσεις για προπώληση, για μετατροπή της παραγωγής από υγρή ζάχαρη σε στερεή η οποία μπορεί να αποθηκευτεί με μικρότερο κόστος, κ.λπ.

Παραδοσιακά, η εκτίμηση της παραγωγής γινόταν απλά στη βάση λήψης δειγμάτων φυτών από τυχαίως επιλεγμένα αγροτεμάχια. Τέτοια συστήματα παραμένουν κοινά σε όλη την Ευρώπη. Σταδιακά, δημιουργήθηκε μια τράπεζα δεδομένων έτσι ώστε οι προβλέψεις μπορούσαν να γίνουν στη βάση σύγκρισης της τάσης της παραγωγής της τρέχουσας χρονιάς με την τάση προηγούμενων ετών.

Αυτές οι μέθοδοι έχουν πολλά μειονεκτήματα. Η δειγματοληψία απαιτεί αρκετό μόχθο και καθίσταται ιδιαίτερος δαπανηρή. Επειδή η διαδικασία λειτουργεί σε μια ιστορική και όχι μια μηχανιστική βάση, δεν μπορεί να λάβει υπόψη εξαιρετικές συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν την παραγωγή. Παραδείγματος χάριν, το 1982 στο μεγαλύτερο μέρος της Βορειοδυτικής Ευρώπης επικράτησαν πολύ ευνοϊκές συνθήκες για πρώιμη σπορά, που ακολουθήθηκαν από ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες κατά τον Μάιο και Ιούνιο με αποτέλεσμα μια άνευ προηγούμενου ανάπτυξη. Με την απουσία προηγούμενων δεδομένων που να καλύπτουν αυτό το εύρος των συνθηκών, δεν υπήρχε βάση στην οποία να στηριχθεί η πρόβλεψη της μετέπειτα πορείας ανάπτυξης της καλλιέργειας (Scott and Jaggard, 2000).

Η μέθοδος των συζυγών διευθύνσεων προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα, δίδοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας σχέσης που λειτουργεί σε μια υπολογιστική (μηχανιστική) και όχι ιστορική βάση και μπορεί να λάβει υπόψη εξαιρετικές συνθήκες που ενδέχεται να επηρεάσουν την παραγωγή.

Ανακεφαλαίωση

9.1. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες της κοινωνίας για βελτίωση των συνθηκών ζωής έχουν οδηγήσει τον άνθρωπο σε μια, άνευ προηγουμένου, υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων του πλανήτη. Για το λόγο αυτό, η ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη. Όσον αφορά τους υδατικούς πόρους, η μεγαλύτερη πίεση ασκείται σ' αυτούς από την αρδευόμενη γεωργία, που σε πολλές περιοχές του πλανήτη καταναλώνει το 80% περίπου του διαθέσιμου νερού. Η πίεση αυτή, αλλά και η πρόσθετη ποιοτική επιβάρυνση που δημιουργεί η αρδευόμενη γεωργία στους υπόγειους υδροφορείς, λόγω της έκπλυσης λιπασμάτων και αγροχημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες, απαιτεί συνεχή φροντίδα για την αποτελεσματική χρήση του νερού και την ανάπτυξη ή βελτίωση των μεθόδων εφαρμογής και διαχείρισής του.

Η προσπάθεια για την επίτευξη μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας κατά την εφαρμογή του νερού στις αρδεύσεις, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών και ποικίλων μεθόδων άρδευσης. Η στάγδην άρδευση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις σύγχρονες μεθόδους άρδευσης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού, τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υπόγεια εφαρμογή της. Το σύστημα υπόγειας στάγδην άρδευσης αποτελεί μία παραλλαγή του ευρέως διαδεδομένου συστήματος άρδευσης με σταγόνες, στην οποία οι αγωγοί εφαρμογής τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αντί να τοποθετούνται επιφανειακά.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν: (i) η σύγκριση της υπόγειας με την επιφανειακή στάγδην άρδευση με όρους εξοικονόμησης και αποδοτικότητας χρήσης νερού, (ii) η ανάπτυξη μιας διαδικασίας υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου άρδευσης, (iii) η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών εφαρμογής του νερού από το σύστημα άρδευσης, (iv) η διερεύνηση της πιθανότητας βελτίωσης της απόδοσης

της καλλιέργειας με τη χρήση αυτών των τεχνικών και (ν) η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της παραγωγικότητας της καλλιέργειας και κλιματικών δεδομένων και αρδευτικού νερού.

Η έρευνα αυτή συγκέντρωσε τις υπάρχουσες δημοσιευμένες πληροφορίες για την υπόγεια στάγδην άρδευση (ΥΣΑ) μέσω μιας εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Στην ανασκόπηση περιελήφθησαν πληροφορίες για την επίδραση της ΥΣΑ στην απόδοση καλλιεργειών, σε σύγκριση μεταξύ ΥΣΑ και άλλων μεθόδων, σε σχέση με το βάθος τοποθέτησης του πλευρικού, την ισαποχή των πλευρικών ή τις μεθόδους διαχείρισης της άρδευσης. Τα παραγωγικά αποτελέσματα για πάνω από 30 καλλιέργειες, στις οποίες όμως δεν συμπεριλαμβάνονται τα ζαχαρότευτλα, δείχνουν πως η απόδοση τους με την υπόγεια στάγδην άρδευση στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν μεγαλύτερη ή ίση προς αυτή που επιτεύχθηκε με άλλες αρδευτικές μεθόδους, περιλαμβανομένης της επιφανειακής στάγδην.

Έγιναν πειράματα ζαχαροτεύτλων σε αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όπου εγκαταστάθηκαν συστήματα υπόγειας και επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν την τριετία 2003-2005. Το έδαφος στη θέση του πειραματικού αγρού έχει υφή αργιλοπηλώδη και κοκκομετρική σύσταση μετρίως λεπτόκοκκη έως λεπτόκοκκη.

Το πειραματικό σχέδιο περιελάμβανε οχτώ μεταχειρίσεις σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν:

Επιφανειακή εφαρμογή νερού με σταγόνα. Συνεχής (συμβατική) εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της άρδευσης μέσω του επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.

Επιφανειακή διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα. Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω επιφανειακού συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.

Επιφανειακή εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα με βαρύτητα. Εφαρμογή του νερού μέσω επιφανειακού συστήματος στάγδην με χαμηλή παροχή σταλακτών (0,8 L/h) μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης δια βαρύτητας.

Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα. Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος με παροχή σταλακτών 2,3 L/h.

Υπόγεια διακοπτόμενη εφαρμογή με σταγόνα. Διακοπτόμενη εφαρμογή του νερού μέσω υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h. Τον αρδευτικό

κύκλο διάρκειας μιας ώρας ακολουθούσε παύση της άρδευσης ίδιας διάρκειας.

Υπόγεια εφαρμογή χαμηλής παροχής με σταγόνα με βαρύτητα. Εφαρμογή του νερού μέσω υπογείου συστήματος στάγδην με χαμηλή παροχή (0,8 L/h) μέσω συστήματος χαμηλής πίεσης δια της βαρύτητας.

Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με ταυτόχρονη εφαρμογή αέρα. Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή σταλακτών 2,3 L/h και ταυτόχρονη παροχέτευση αέρα στο σύστημα μέσω συσκευής venturi.

Υπόγεια εφαρμογή νερού με σταγόνα με εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης. Συνεχής εφαρμογή του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της άρδευσης μέσω του υπογείου συστήματος στάγδην με παροχή 2,3 L/h και παροχέτευση αέρα υπό πίεση στο τέλος της άρδευσης μέσω αεροσυμπιεστή.

Οι υπόγειοι αγωγοί εφαρμογής τοποθετήθηκαν με τη χρήση υπεδαφοθέτη σε βάθος 0,45 m., ενώ η ισαποχή των σταλακτηφόρων αγωγών ήταν 1,0 m και στα δύο συστήματα. Έτσι, τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό δίκτυο ανάμεσα σε δύο σταλακτηφόρους αγωγούς παρεμβάλλονταν δύο σειρές φυτών. Οι αγωγοί εφαρμογής, διαμέτρου 20 mm, είχαν ενσωματωμένους αυτορυθμιζόμενους σταλάκτες με παροχή 2,3 L h⁻¹ σε ένα εύρος πίεσης από 50 έως 300 kPa, σε ισαποχή 0,8 m.

Το σύστημα χαμηλής παροχής με βαρύτητα περιελάμβανε μια δεξαμενή νερού από πλαστικό χωρητικότητας 200 L και δευτερεύοντες αγωγούς διαμέτρου 32 mm στους οποίους συνδέθηκαν οι πλευρικοί αγωγοί. Η δεξαμενή διέθετε μηχανισμό με πλωτήρα για τον έλεγχο (ρύθμιση) της στάθμης του νερού και επομένως της πίεσης του συστήματος.

Η παροχέτευση αέρα στο σύστημα επιτυγχάνετο με την έγχυση αέρα με ρυθμό 12% κατ' όγκο της χορηγούμενης ποσότητας νερού, χρησιμοποιώντας μια συσκευή venturi συνδεδεμένη παράλληλα στην γραμμή άρδευσης. Για την εφαρμογή αέρα υπό πίεση, χρησιμοποιήθηκε ένας αεροσυμπιεστής που συνδέθηκε στην κεφαλή ελέγχου και παροχέτευε αέρα υπό πίεση μέσω των πλευρικών, μετά το τέλος της άρδευσης και για χρονική περίοδο τόση όση χρειαζόταν για να εφαρμοσθεί αέρας σε ποσοστό περίπου 12% του εφαρμοσθέντος νερού.

Στον πειραματικό αγρό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους με τη μέθοδο TDR και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τη συσκευή SunScan. Προσδιορίστηκαν επίσης οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους σε αδιατάρακτα

δείγματα και η υδραυλική αγωγιμότητα μετρήθηκε στον αγρό με το υδατοπερατόμετρο Guelph. Η ποσότητα του νερού που εφαρμοζόταν σε κάθε άρδευση ελέγχονταν και καταγραφόταν μέσω μηχανικών υδρομέτρων.

Στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου γινόταν η συλλογή των φυτών, χειρωνακτικά. Με βάση τις μετρήσεις υπολογίστηκε το μέσο βάρος του υπόγειου και του υπέργειου τμήματος των φυτών, η στρεμματική απόδοση και η σχετική αναλογία ριζών και κορυφών. Οι αναλύσεις έγιναν από την Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, στα εργαστήρια του Εργοστασίου Λάρισας και περιελάμβαναν τον προσδιορισμό του ζαχαρικού τίτλου (ΡοΙ, ζαχαρόζη % του νωπού βάρους) και τη συγκέντρωση των μελασσογόνων ουσιών (κάλιο, Κ, νάτριο, Να, και επιβλαβές άζωτο, α-N).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, που είναι εγκατεστημένος στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αφορούν ημερήσιες τιμές των παραμέτρων: θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας αέρα, ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και βροχόπτωσης.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής (ΕΤ) και ο προγραμματισμός των αρδεύσεων ακολούθησαν την μεθοδολογία FAO-56. Χρησιμοποιήθηκαν εδαφικές παράμετροι και στοιχεία της καλλιέργειας προκειμένου να υπολογισθεί ένα ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στο Excell υπολογίζει δύο υδατικά ισοζύγια. Ένα ισοζύγιο για το ριζόστρωμα και ένα για το επιφανειακό στρώμα (ζώνη εξάτμισης) του εδάφους. Το υδατικό ισοζύγιο στο ριζόστρωμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας και τον προγραμματισμό των αρδεύσεων. Με βάση το σταθερό προαποφασισμένο εύρος αρδεύσεων υπολογιζόταν κάθε φορά η απαιτούμενη δόση άρδευσης ενώ το υδατικό ισοζύγιο στο επιφανειακό στρώμα, προσδιορίζει την εξάτμιση από το έδαφος.

Η μεθοδολογία που παρατίθεται από το FAO-56 δεν πραγματεύεται την περίπτωση της μεθόδου άρδευσης με υπόγεια σταγόνα. Στην παρούσα έρευνα, κατά την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου στο επιφανειακό στρώμα, στην περίπτωση της ΥΣΑ, λήφθηκε υπόψη η μη διαβροχή του επιφανειακού εδάφους.

Οι κλιματικές παράμετροι δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη διαφοροποίηση από έτος σε έτος. Από την έναρξη της στάγδην άρδευσης μέχρι και την λήξη των αρδεύσεων, η συνεισφορά της βροχόπτωσης ήταν σχετικά μικρή και έφθασε τα 48,7 mm το 2003, τα 42,8 mm το 2004 και τα 33,4 mm το έτος 2005. Η συνολική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς

όπως υπολογίσθηκε με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO για την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ανήλθε στα 750,4, 731,2 και 750,3 mm, για κάθε έτος αντιστοίχως.

Το εύρος άρδευσης που ακολουθήθηκε και στα τρία έτη της πειραματικής διαδικασίας ήταν 4 ημέρες, ενώ η δόση υπολογίζονταν μέσω υδατικού ισοζυγίου. Λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς την εξάτμιση από το επιφανειακό έδαφος και θεωρώντας πως στις υπόγειες μεταχειρίσεις το στρώμα των 10 cm δεν διαβρεχόταν από την άρδευση παρά μόνον από την βροχόπτωση, η δόση άρδευσης παρουσίασε διαφοροποίηση μεταξύ επιφανειακού και υπόγειου συστήματος.

Λόγω της μη διαβροχής του επιφανειακού στρώματος του εδάφους στην υπόγεια άρδευση, κατά την διάρκεια των αρδεύσεων μεταχείρισης και κυρίως κατά την περίοδο μικρής φυτοκάλυψης, η εξάτμιση από το επιφανειακό στρώμα στην περίπτωση της υπόγειας εφαρμογής προερχόταν μόνο από την βροχή.

Κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2003 διεξήχθησαν 21 αρδεύσεις με σταγόνα, 19 το 2004 και 21 το 2005 σε όλες τις μεταχειρίσεις. Η συνολική ποσότητα νερού που χορηγήθηκε μέσω της άρδευσης ανήλθε στα 585, 568 και 543 mm για κάθε έτος στην επιφανειακή στάγδην άρδευση ενώ στην υπόγεια έφθασε τα 517, 505 και 482 mm για κάθε έτος αντιστοίχως.

Ως τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, ήταν η σημαντική εξοικονόμηση αρδευτικού νερού που επιτεύχθηκε στην υπόγεια στάγδην σε σχέση με την επιφανειακή. Το ποσοστό του νερού που εξοικονομήθηκε για κάθε αρδευτική περίοδο ανήλθε στο 13,2% το 2003, στο 11,2% το 2004 και στο 11,5% το 2005.

Όσον αφορά την ανάπτυξη της καλλιέργειας, ο LAI επηρεάσθηκε πρόσκαιρα από την άρδευση, αφού κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως σε σχέση με τις επιφανειακές, αλλά επανέκαμψε κατά το 4^ο στάδιο ανάπτυξης και έφθασε σχεδόν στα επίπεδα των επιφανειακών μεταχειρίσεων. Αυτό οφείλεται πιθανόν στην αποκατάσταση της διαδικασίας ευχερούς πρόσληψης νερού από τα φυτά μέσω της ανάπτυξης βαθύτερου ριζικού συστήματος και την πρόσληψη νερού από βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι την «απώλεια» πρόσληψης από το επιφανειακό μη διαβρεχόμενο πλήρως στρώμα. Το ποσοστό της μάζας των ριζών στη συνολική ξηρή μάζα δεν παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Εμφανίζεται όμως μια μικρή πλεον σαφής υπεροχή των υπογείων μεταχειρίσεων.

Η τεχνική εφαρμογής του νερού είχε σημαντική επίδραση στην παραγωγή. Και στις τρεις καλλιεργητικές περιόδους η διακοπτόμενη άρδευση έδωσε το υψηλότερο νωπό βάρος ριζών. Η υπόγεια διακοπτόμενη εφαρμογή (ΥΔ) υπερέιχε και ακολούθησε η ΕΔ, ενώ την μικρότερη απόδοση στο σύνολο των τριών ετών έδωσαν η συμβατική επιφανειακή στάγδην (ΕΣ) και η υπόγεια άρδευση με χαμηλή πίεση (ΥΒ).

Η άρδευση δεν είχε επίδραση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτων. Ο ζαχαρικός τίτλος σε καμία από τις περιόδους δεν παρουσίασε συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Έτσι, η απόδοση σε ζάχαρη έδωσε ανάλογα αποτελέσματα με αυτά της απόδοσης σε βάρος ριζών. Έτσι, οι αρδευόμενες με διακοπτόμενη τεχνική μεταχειρίσεις ΥΔ και ΕΔ έδωσαν την υψηλότερη παραγωγή ζάχαρης ανά στρέμμα και τα τρία έτη. Η υπεροχή των μεταχειρίσεων διακοπτόμενης εφαρμογής αντικατοπτρίζεται και στο υπολογισμένο οικονομικό όφελος που προέκυψε για κάθε μεταχείριση. Ενώ η υπεροχή της διακοπτόμενης εφαρμογής είναι σαφής, δεν υπάρχει συστηματική διαφοροποίηση από εκεί και κάτω μεταξύ των υπολοίπων μεταχειρίσεων, οι οποίες ακολουθούν την τάση που παρατηρήθηκε στην παραγωγή ριζών, εκτός από την ΕΒ, που λόγω μικρότερου ζαχαρικού τίτλου παρουσιάζει μειωμένη στρεμματική απόδοση σε ζάχαρη καθώς και πρόσοδο τα δύο πρώτα έτη.

Η περιεκτικότητα των μελασσογόνων συστατικών στις ρίζες των τεύτων επίσης δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την άρδευση, καθώς δεν σημειώνονται σημαντικές και συστηματικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Οι συγκεντρώσεις του Κ στα δείγματα των τεύτων έδειξαν χαμηλότερη περιεκτικότητα στις μεταχειρίσεις αρδευόμενες υπογείως, χωρίς σημαντική διαφορά. Στην περιεκτικότητα του Να στις ρίζες των τεύτων, οι μεταχειρίσεις επιφανειακής άρδευσης εμφάνισαν υψηλότερες τιμές και τα τρία έτη, αλλά δεν σημειώνονται στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Τέλος, τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του α-αμινο Ν στις ρίζες των ζαχαροτεύτων δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Από την αξιολόγηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Οι τεχνικές άρδευσης με υπόγεια σταγόνα παρουσιάζονται αποδοτικότερες από τις επιφανειακές τεχνικές. Η υπόγεια διακοπτόμενη άρδευση (ΥΔ) αξιολογείται ως η πλέον αποδοτική τεχνική που εφαρμόστηκε, αφού παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές τόσο σε αποδοτικότητα νερού άρδευσης όσο και σε συνολική αποδοτικότητα και για τα τρία έτη πειραματισμού. Αντιθέτως, η επιφανειακή συνεχής (συμβατική) άρδευση (ΕΣ), αξιολογείται ως η λιγότερο αποδοτική αφού και για τις τρεις

καλλιεργητικές περιόδους παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές, τόσο σε αποδοτικότητα νερού άρδευσης, όσο και σε συνολική αποδοτικότητα.

Η διακύμανση και η κατανομή της υγρασίας στο έδαφος επηρεάσθηκε από τις τεχνικές που εφαρμόσθηκαν. Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας δείχνει πως η διακοπτόμενη άρδευση, τόσο στο επιφανειακό όσο και στο υπόγειο σύστημα, παρήγαγε μεγαλύτερες επιφάνειες διαβροχής. Στην επιφανειακή άρδευση, η αύξηση της υγρασίας ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση της διακοπτόμενης εφαρμογής έως το βάθος των 0,60 m εν συγκρίσει με την συνεχή άρδευση. Ανάλογη τάση εμφανίζεται και στα υπογείως αρδευόμενα τεμάχια, όπου, η διακοπτόμενη εφαρμογή παρήγαγε μεγαλύτερη επιφάνεια διαβροχής από ότι η συνεχής στο βάθος των 0,30-0,90 m.

Η καταγραφή της υγρασίας στην εδαφική κατατομή έδειξε πως στις εφαρμογές διακοπτόμενης άρδευσης η ομοιομορφία των μετρημένων τιμών της υγρασίας ήταν καλύτερη σε σχέση με αυτήν της συνεχούς εφαρμογής. Καλή ομοιομορφία παρουσίασαν επίσης η επιφανειακή εφαρμογή με χαμηλή παροχή και η συνεχής εφαρμογή αέρα. Αντιθέτως, η εφαρμογή αέρα στο τέλος της άρδευσης και ειδικότερα η υπόγεια εφαρμογή με χαμηλή πίεση παρουσίασαν αυξημένες τιμές υγρασίας κυρίως κάτω από το επίπεδο τοποθέτησης του αγωγού εφαρμογής.

Το γεγονός ότι η εφαρμογή του νερού διακοπτόμενα αυξάνει το πλάτος της επιφάνειας διαβροχής, παρατηρήθηκε ασφαλώς στην εδαφική επιφάνεια με τη μέτρηση της διαμέτρου διαβροχής για τις τρεις επιφανειακές μεταχειρίσεις, ήτοι την ΕΣ, την ΕΔ και την ΕΒ. Η διάμετρος έφθασε στην μέγιστη απόσταση από το σημείο διανομής στην περίπτωση της διακοπτόμενης εφαρμογής. Η ανάπτυξη της διαμέτρου διαβροχής με το χρόνο στην επιφανειακή διακοπτόμενη άρδευση, περιγράφεται με μια γραμμική εξίσωση εν αντιθέσει με την εκθετική που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της στη συμβατική στάγδην άρδευση.

Γενική διαπίστωση αποτελεί η αυξημένη οριζόντια ανάπτυξη του υγρού μετώπου στην περίπτωση της διακοπτόμενης άρδευσης, τόσο στο υπόγειο σύστημα όσο και στο επιφανειακό. Ταυτοχρόνως, παρατηρείται σχετικά μικρότερη καθοδική κίνηση στις μεταχειρίσεις της διακοπτόμενης εφαρμογής και ελαφρά μεγαλύτερη ανοδική κίνηση στην ΥΔ σχετικά με την ΥΣ.

Στην περίπτωση άρδευσης με χαμηλή παροχή, υπάρχει σαφής διαφοροποίηση με τα προηγούμενα, καθώς η καθοδική κίνηση του νερού είναι μεγαλύτερη και η οριζόντια μικρότερη από τις άλλες μεταχειρίσεις. Ειδικότερα στην περίπτωση της ΥΒ

παρατηρείται μικρή ανοδική κίνηση του νερού ενώ καταγράφεται η πλέον αυξημένη καθοδική κίνηση που δείχνει απώλεια από το ενεργό ριζόστρωμα.

Με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου των συζυγών διευθύνσεων προσεγγίσθηκαν πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα παραγωγής ριζών και παρήχθη μια σχέση πρόβλεψης της παραγωγικότητας των ζαχαροτεύτλων συναρτήσεως της θερμοκρασίας του αέρα, της ηλιακής ακτινοβολίας και του αρδευτικού νερού που εφαρμόζεται.

Η έρευνα αυτή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιορίζονται στην καλλιέργεια και τον τύπο εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι προτεινόμενες τεχνικές άρδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παραγωγούς. Κι αυτό βέβαια με τη σκέψη ότι η συστηματική αξιολόγηση των μεθόδων αυτών με επιπλέον πειραματικά αποτελέσματα παραμένει ένα κρίσιμο ζήτημα, είτε προορίζονται για πρακτική εφαρμογή, είτε για βελτίωση της υπάρχουσας γνώσης. Το ζήτημα αυτό θα εξακολουθήσει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, που όλο και περισσότερο εντείνει την προσπάθεια για βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης του αρδευτικού νερού και της εξοικονόμησης αυτού, λόγω των πιεστικών περιβαλλοντικών προβλημάτων που υπάρχουν και που συνεχώς διογκώνονται.

Η υιοθέτηση της υπόγειας στάγδην άρδευσης από τους Έλληνες καλλιεργητές παρουσιάζεται δύσκολη, για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος είναι «υποκειμενικός», αφού σχετίζεται με την δυσπιστία του παραγωγού ως προς την γενικότερη απόδοση του συστήματος, αφού δεν το «βλέπει». Το ίδιο βεβαίως συνέβη και στην περίπτωση της επιφανειακής στάγδην κατά την αρχή της μαζικής χρήσης της στη χώρα (τέλη της δεκαετίας του 1980), συνθήκη όμως η οποία αναιρέθηκε κυρίως λόγω των υψηλότερων αποδόσεων που παρουσίασε η μέθοδος και που αποτέλεσε το βασικότερο κριτήριο επιλογής της.

Ο δεύτερος λόγος είναι «αντικειμενικός» αφού ο μικρός κλήρος, η καλλιέργεια ενοικιασμένων αγροτεμαχίων και ο διασκορπισμός αυτών, αποτελούν τροχοπέδη στην απόφαση για επένδυση σε ένα «μόνιμο» σύστημα άρδευσης.

Βεβαίως, πριν την υιοθέτηση σύγχρονων και καινοτόμων, περισσότερο αποδοτικών μεθόδων και συστημάτων άρδευσης, ο Έλληνας καλλιεργητής πρέπει να αναγνωρίσει και να αποδεχθεί την αποδοτικότητα με όρους χρήσης νερού και όχι μεγέθους παραγωγής.

9.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας μπορούν να γίνουν μερικές υποδείξεις για μελλοντικές έρευνες:

- Διεξαγωγή αντίστοιχων πειραμάτων σε άλλες καλλιέργειες, ειδικότερα σε υδροβόρες ή σε περιπτώσεις όπου η αξία του εμπορεύσιμου προϊόντος είναι χαμηλή και η διατήρηση της καλλιέργειας φαίνεται ζημιογόνος.
- Ο προγραμματισμός της άρδευσης να βασισθεί σε μετρήσεις εδαφικής υγρασίας. Η χρησιμοποίηση ενός αυτοματοποιημένου δικτύου αισθητήρων εδαφικής υγρασίας θα δώσει ασφαλή συμπεράσματα για την ποσότητα νερού που μπορεί να εξοικονομηθεί με τη χρήση ΥΣΑ.
- Με τη χρήση ενός τέτοιου δικτύου και με την συνεχή καταγραφή της υγρασίας, μπορούν να εκτιμηθούν οι πιθανές απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης αλλά και να υπολογισθεί η πρόσληψη νερού για κάθε στρώση εδάφους.
- Ο εδαφικός τύπος και κατά συνέπεια τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους είναι καθοριστικοί παράγοντες της ποσότητας νερού που μπορεί να εξατμισθεί από την εδαφική επιφάνεια. Έτσι, η εκτέλεση πειραμάτων σε διαφορετικής σύστασης εδάφη θα συμπλήρωνε την εκτίμηση της εξάτμισης και την δυναμική εξοικονόμηση νερού με τη χρήση ΥΣΑ.
- Σε όλες τις μεταχειρίσεις, θεωρήθηκε ένα ποσοστό διαβρεχόμενης επιφάνειας 50%. Το ποσοστό όμως της διαβρεχόμενης επιφάνειας, όπως αποδείχθηκε από τις μετρήσεις της διαβρεχόμενης διαμέτρου, διαφέρει ανάμεσα στις επιφανειακές εφαρμογές. Χρήζει λοιπόν περαιτέρω διερεύνησης η εκτίμηση της εξάτμισης από την επιφανειακή εδαφική στρώση υπό τις τρεις μεταχειρίσεις λαμβανομένου υπόψη του ποσοστού διαβροχής σε κάθε περίπτωση στην αξιολόγηση της εξατμισοδιαπνοής.
- Ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής να λαμβάνει υπόψη τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI).
- Η εκτέλεση πειραμάτων στην ίδια ή άλλες καλλιέργειες με την εφαρμογή αέρα μέσω της άρδευσης σε διάφορα επίπεδα και η διεξαγωγή εδαφικών αναλύσεων και μετρήσεων του εδαφικού οξυγόνου προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της ποσότητας του αέρα στην καλλιέργεια και κυρίως η πιθανότητα να αποτελέσει μια φυσική πηγή εμπλουτισμού του εδάφους με άζωτο.

- Η εκτέλεση πειραμάτων με την εφαρμογή της διακοπτόμενης άρδευσης υπό διαφορετικές στρατηγικές. Παραδείγματος χάριν, παύσεις μεγαλύτερες ή μικρότερες του κύκλου άρδευσης.
- Ο συνδυασμός τεχνικής διακοπτόμενης άρδευσης με τεχνικές διακοπτόμενης εφαρμογής λιπασμάτων.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατανομή των ριζών, κυρίως ως προς το βάθος στην περίπτωση της υπόγειας στάγδην. Η εφαρμογή οποιασδήποτε τεχνικής θα μπορούσε να συνοδευτεί με την μέτρηση της χωρικής κατανομής των ριζών της καλλιέργειας.
- Ενδιαφέρον επίσης, παρουσιάζουν και οι παρατηρήσεις που έγιναν στον αγρό, σχετικά με την μη παρουσία ζιζανίων στα πειραματικά τεμάχια όπου εφαρμοζόταν η υπόγεια στάγδην άρδευση, όπως και η μη εμφάνιση του μύκητα *Cercospora beticola*. Στα αποτελέσματα αυτά προφανώς συντέλεσε το γεγονός ότι στα πειραματικά τεμάχια της υπόγειας στάγδην το επιφανειακό στρώμα του εδάφους παρέμενε ξηρό. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η ζιζανιοκτονία και οι ψεκασμοί αντιμετώπισης της κερκόσπορας κατέχουν ένα μεγάλο ποσοστό του κόστους της καλλιέργειας, τα πεδία αυτά αξίζει να μελετηθούν.
- Χρήζει μελέτης μια οικονομική ανάλυση. Μια επένδυση στην ΥΣΑ μπορεί να μειώσει το κόστος του αρδευτικού νερού. Η σχέση κόστους νερού και κόστους συστήματος να συγκριθεί με άλλες περιπτώσεις.

Βιβλιογραφία

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου Ι., Σ. Κωτσόπουλος, Γ. Ζέρβα και Π. Βύρλας, 2000. Σύγκριση υπολογισμένων τιμών της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής καλλιεργειών με τις εξισώσεις Penman και Penman-Monteith. *Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής*, Βόλος, σελ. 133 - 140.
- Αλεξίου Ι., Δ. Καλφούντζος, Σ. Κωτσόπουλος, Π. Βύρλας και Σ. Καμπέλη, 2003. Σύγκριση της υποεπιφανειακής και της επιφανειακής στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια βαμβακιού. *Πρακτικά, 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης*, Θεσσαλονίκη, σελ. 199-206.
- Βύρλας, Π., 1995. Έμφραξη λόγω εισρόφησης σε υποεπιφανειακά συστήματα στάγδην άρδευσης. *Γεωργική Τεχνολογία*, 6:77-80.
- Βύρλας, Π., Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη και Δ. Καλφούντζος, 2003. Επίδραση του εδαφικού τύπου στην έμφραξη λόγω εισρόφησης σε υποεπιφανειακά συστήματα στάγδην άρδευσης. *Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (EYE)*, 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, σ. 225-232.
- ΕΒΖ ΑΕ, 1981. *Αποτελέσματα ερευνητικού έτους 1981*.
- ΕΒΖ ΑΕ, 1997. *Το πότισμα των ζαχαροτεύτλων*.
- Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, 2000. *Απογραφή Γεωργίας/Κτηνοτροφίας*.
- Καβαλάρης, Χ., 2004. *Μελέτη εναλλακτικών μεθόδων κατεργασίας του εδάφους σε συστήματα αμειψισποράς ζαχαροτεύτλων, καλαμποκιού και βαμβακιού*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Μήτσιος, Ι., Μ. Τούλιος, Α. Χαρούλης, Φ. Γάτσιος και Σ. Φλωράς, 2000. *Εδαφολογική μελέτη και εδαφολογικός χάρτης του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου*. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα.
- Ντιούδης, Π., Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Γ. Τερζίδης, Ν. Μασλάρης και Γ. Νούσιος, 2003. Διαφορετικές διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων. *Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (EYE)*, 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, σ. 159-166.

- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., 1996. Συνολικές ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών του Θεσσαλικού κάμπου. *Υδροτεχνικά* 6:62-77.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Γ. Τερζίδης, Χ. Τζιμόπουλος και Μ. Δέλλιος, 1994. Προσδιορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πειραματικού αγρού πεδιάδας Θεσσαλονίκης. *Υδροτεχνικά* 2: 455-465.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Χ. Τζιμόπουλος και Δ. Καλφούντζος, 1997. Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τη μέθοδο TDR και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων. Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), Πάτρα, σ. 184– 92.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Ν. Μασλάρης, Δ. Καλφούντζος και Χ. Γούλας, 1998. Μελέτη διατάξεων άρδευσης με σταγόνες στην καλλιέργεια ζαχαρότευτλων. Πρακτικά 1^{ου} Εθνικού Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), Αθήνα, σ. 271-280.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Ν. Μασλάρης, Γ. Νούσιος, Π. Ντιούδης και Δ. Καλφούντζος, 1999. Μελέτη διατάξεων άρδευσης με σταγόνες στην καλλιέργεια των ζαχαρότευτλων. Πρακτικά 4^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Εταιρείας Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Βόλος, σ. 162-169.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Δ. Καλφούντζος και Ν. Παπανίκος, 2000. Αξιολόγηση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων. Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, σ. 157-164.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Δ. Παπαλέξης, Ν. Δαναλάτος, Π. Βουλτσάνης και Ν. Νάκος, 2003α. Επίδραση επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή της ενεργειακής καλλιέργειας του σόργου στην Κεντρική Ελλάδα. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 2-5 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, σ. 183-190.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Ι. Τέντας, Α. Κολιού, Δ. Καλφούντζος και Ν. Παπανίκος, 2003β. Άρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 29-31 Μαΐου, Θεσσαλονίκη, σ. 265-272.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Β. Βαρδούλη, Π. Βύρλας, Α. Κολιού και Ν. Παπανίκος, 2004. Επαναχρησιμοποίηση υγρών αστικών αποβλήτων για άρδευση πρασίνου. Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου, 7-9 Μαΐου, Ορεστιάδα, σ. 279-286.

- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Κ. Δημοπούλου, 2005α. Επίδραση διαφορετικού εύρους άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύλων. Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών (ΕΓΜΕ), Οκτώβριος, Αθήνα.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Κ. Δημοπούλου, 2005β. Άρδευση ζαχαροτεύλων με επιφανειακή σταγόνα σε διαφορετικά επίπεδα εφαρμογής νερού. Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών (ΕΓΜΕ), Οκτώβριος, Αθήνα.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Β. Βαρδούλη και Π. Βύρλας, 2005γ. Άρδευση πρασίνου με τη χρήση υγρών αστικών αποβλήτων. Πρακτικά 4^{ου} Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 6-9 Απριλίου, Ξάνθη, σ. 557-562.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Ε. Παπαδάκης, Ν. Παπανίκος και Δ. Παπαλέξης, 2006α. Υπόγεια άρδευση του ενεργειακού φυτού σόργου με υγρά αστικά απόβλητα. Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου Μονάδες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας, Πορταριά, σ. 449-456.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Β. Βλάχος και Χ. Παπανικολάου, 2006β. Επίδραση διαφορετικών διατάξεων στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση του βάμβακος. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 13-16 Δεκεμβρίου, Ξάνθη, σ. 637-644.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. και Ε. Παπαδάκης, 2006γ. Υπόγεια άρδευση του ενεργειακού φυτού σόργου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 13-16 Δεκεμβρίου, Ξάνθη, σ. 645-652.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Χ. Παπανικολάου και Σ. Πατελοδήμου, 2007α. Υπόγεια άρδευση σε καλλιέργεια βαμβακιού με διαφορετικές δόσεις άρδευσης. Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα, σ. 173-180.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Κ. Δημοπούλου και Θ. Βούλγαρης, 2007β. Σύγκριση επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζαχαροτεύλων. Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδας (ΕΓΜΕ), 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα, σ. 181-188.
- Τερζίδης, Α.Γ. και Γ.Ζ. Παπαζαφειρίου, 1997. Γεωργική υδραυλική. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Τζιμόπουλος, Χ., Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη και Σ. Γιαννόπουλος, 1996. Πειραματικές μετρήσεις και στατιστική ανάλυση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στον αγρό. Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου "Εγγειοβελτιωτικά

232 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Έργα - Διαχείριση υδατικών πόρων - Εκμηχάνιση γεωργίας", ΓΕΩ.ΤΕ.Ε, Λάρισα, 24-27 Απριλίου, Τόμος Β: 868-877.

Τζιμόπουλος, Χ., Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη και Σ. Γιαννόπουλος, 2000. Μελέτη της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο ύπαιθρο με στατιστικές και γεωστατιστικές μεθόδους. *Τεχνικά Χρονικά* 20: 31-40.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adamsen, F.J., 1989. Irrigation method and water quality effect on peanut yield and grade. *Agron. J.* 81(4):589-593.
- Alam, M., and I. Broner, 2001. Subsurface micro irrigation. In "Colorado State University Cooperative Extension Crop Series, Irrigation No. 4.716". Colorado State University.
- Alam, M., T. Trooien, S. Stone and D. Rogers, 2000. Subsurface drip irrigation for Alfalfa. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 373-378. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Allen, R.G., 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. of Hydrology* 229:27-41.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp.
- Allen, R.G., I.A. Walter, R.Elliot, B. Mecham, M.E. Jensen, D. Itenfisu, T.A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Echings, T. Spofford, M. Hattendorf, R.H. Cuenca, J.L. Wright and D. Martin, 2000. Issues, requirements and challenges in selecting and specifying a standardized ET equation. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 201-208. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Al-Nabulsi, Y.A., A.M. Hilalia, O.A. Al-Tahir, S.H. Mahmoud, A.A. Al-Jasim and A.H. Al-Arfaj, 2000. Subsurface drip irrigation technology for safflower production and water conservation in Saudi Arabia. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 647-653. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Al-Qinna, M.I. and A.M. Abu-Awwad, 2001. Wetting patterns under trickle source in arid soils with surface crust. *J. of Agric. Engng Res.* 80(3):301-305.
- Amaducci, M.T., A. Caliandro, L. Cavazza, A. De Caro, and G. Venturi, 1978. Effects of irrigation on different sugar beet varieties in different locations and years. In *Proc. 39th Winter Congress of the International Institute for Sugar Beet Research*, pp. 423-28.
- Amali, S., D.E. Rolston, A.E. Fulton, B.R. Hanson, C.J. Phene and J.D. Oster, 1997. Soil water variability under subsurface drip and furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 17:151-155.
- Amir, I., and J. Dag, 1993. Lateral and longitudinal wetting patterns of very low energy moving emitters. *Irrig. Sci.* 13:183-187.

- Analogides, D. A., 1993. Estimating sugar beet irrigation requirements on the basis of climatic parameters in Greece: results and conclusions from a 6-year experimental study (1980—85). In: Anonymous (eds), *Proc. 56th IIRB Congress*, Brussels, pp. 259—269. International Institute for Beet Research, Brussels.
- ASAE Standards, 43rd Ed., 2003. S526.1. Soil and water terminology. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Ayars, J.E., R.B. Hutmacher, G.J. Hoffman, J. Letey, J. Ben-Asher, and K.N. Solomon, 1990. Response of sugar beet to non-uniform irrigation. *Irrig. Sci.* 11:101-109.
- Ayars, J. E., C.J. Phene, R.A. Schoneman, B. Meso, F. Dale and J. Penland, 1995. Impact of bed location on the operation of subsurface drip irrigation systems. In *Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources / Preserving the Environment, Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 2-6 April, Orlando, FL, pp. 141-146. ASAE.
- Ayars, J.E., C.J. Phene, R.B. Hutmacher, K.R. Davis, R.A. Schoneman, S.S. Vail and R.M. Mead, 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Mgt.* 42:1-27.
- Ayars, J.E., R.A. Schoneman, F. Dale, B. Meso and P. Shouse, 2001. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water. *Agric. Water Mgt.* 47:243-264.
- Barbanti, L., 1994. New methods of recommending N-fertilizer use to sugar beet in the Mediterranean area. In Anonymous, eds. *Proc. 57th IIRB Congress*, Brussels, pp. 281-294. International Institute for Beet Research, Brussels, Belgium.
- Barth, H.K., 1995. Resource conservation and preservation through a new subsurface irrigation system. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 168-174. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Barth, H.K., 1999. Sustainable and effective irrigation through a new subsoil irrigation system (SIS). *Agric. Water Mgt.* 40:283-290.
- Bar-Yosef, B., B. Sagiv and T. Markovitch, 1989. Sweet corn response to surface and subsurface trickle phosphorus fertigation. *Agron. J.* 81(3):443-447.
- Bar-Yosef, B., H.J.J. Martinez, B. Sagiv, I. Levkovitch, Markovitch and C.J. Phene, 1991. Processing tomato response to surface and subsurface drip phosphorus fertigation. Bard Project Scientific Report. Bet Dagan, Israel, pp 175–191
- Batchelor, C.H. and G.C. Soopramanien, 1995. Water use and irrigation control of drip-irrigated sugar cane. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 717-722. St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Batchelor, C.H., G.C. Soopramanien, J.P. Bell, R. Nayamuth and M.G. Hodnett, 1990. Importance of irrigation regime, dripline placement and row spacing in the drip irrigation of sugar cane. *Agric. Water Mgt.* 17:75-94.
- Batchelor, C.H., C.J. Lovell, M. Murata and S.P. McGrath, 1994. Improving water use effectiveness by subsurface irrigation. *Aspects of Appl. Biol.* 38:269-278.
- Battam, M.A. and B.G. Sutton, 2003. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems. *Irrig. Sci.* 22:135-141.
- Bazza, M., 1993. Effect of drought stress and the time of its occurrence in the cycle on the sugar beet yield and technological quality. *Proc. 56th IIRB winter congress*, Bruxelles, pp. 119-130.
- Beckman, F.S., 1960. *The solution of linear equations by the conjugate gradient method*. Mathematical Methods for Digital Computers, Vol. 1, 62-72. (Ed. by A. Ralston and H. S. Wilf). John Wiley and Sons, New York, 293 pp.
- Beeson, R.C. and J.J. Haydu, 1995. Pulsing microirrigation for production of container-grown landscape ornamental: I. Plant growth and water conservation. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 552-558. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Ben-Asher, J., and C.J. Phene, 1993. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In *Subsurface Drip Irrigation - Theory, Practices and Application*, 185-202. CATI Pub. No. 92 1001. Fresno, Calif.: California State University.
- Ben-Asher, J., T. Yano and I. Shainberg, 2003. Dripper discharge rates and the hydraulic properties of the soil. *Irrig. Drain. Systems*, 17:325-339.
- Ben-Gal, A., N. Lazorovitch and U. Shani, 2004. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone J.* 3:1407-1413.
- Benz, L.C., E.J. Doering and G.A. Reichman, 1985. Water-table and irrigation effects on corn and sugarbeet. *ASAE Trans.* 28:1951-6.
- Berkowitz, S.J., 2001. Hydraulic performance of subsurface wastewater drip systems. In *On-Site Wastewater Treatment, Proc. 9th Natl. Symp. on Individual and Small Community Sewage Systems*, 11-14 March, Fort Worth, Texas, USA, ed. K. Mancl., ASAE, pp. 583-592.
- Bhattarai, S.P., S. Huber and D. Midmore, 2004. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils. *Ann. Appl. Biol.* 144:285-298.
- Biernbaum, J.A., 1992. Root-zone management of greenhouse container-grown crops to control water and fertilizer. *HortTechnology* 2:127-132.

- Bordovsky, J.P. and D.O. Porter, 2006. Comparison of subsurface drip irrigation uniformity designs on cotton production. *ASABE Paper No. 062276*. St. Joseph, Mich.: ASABE.
- Bos, M.G., 1980. Irrigation efficiencies at crop production level. *ICID Bulletin* 29(2):18-25,60.
- Bos, M.G., 1985. Summary of ICID definitions of irrigation efficiency. *ICID Bulletin* 34:28-31.
- Bosch, D.J., N.L. Powell and F.S. Wright, 1992. An economic comparison of subsurface microirrigation with center pivot sprinkler irrigation. *J. Prod. Agric.* 5(4): 431-437.
- Bracy, R.P., R.J. Edling and E.B. Moser, 1995. Drip-irrigation management and fertilization of bell pepper in a humid area. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 181-186. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Brandt, A., Bresler E, Diner N, Ben-Asher I, Heller J, Goldberg D., 1971. Infiltration from a trickle source. I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:675-682.
- Braud, H.J., 1970. Subsurface irrigation in the Southeast. In *Proc. Nat. Irrig. Symp.*, pp. E1-E9. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Breda, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods. Instruments and current controversies. *J. Exper. Botany* 54:2403-2417.
- Bresler, E., 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrig. Sci.* 1:3-17.
- Bresler, E., J. Heller, N. Diner, J. Ben-Asher, A. Brandt and D. Goldberg, 1971. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Society of America Proceeding* 35: 683-689.
- Bristow, K.L., C.M. Cote, P.J. Thorburn and F.J. Cook, 2000. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation In *Proc. 6th Intl Micro-Irrigation Congress*, October 22-27, South Africa.
- Brown, K.F. and P.V. Biscoe, 1985. Fibrous root growth and water use of sugar beet. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 105:679-691.
- Brown, K.F., A.B. Messemer, R.J. Dunham and P.V. Biscoe, 1987. Effect of drought on growth and water use of sugar beet. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 109:421-435.
- Brown, K.W., J.C. Thomas, S. Friedman and A. Meiri, 1996. Wetting patterns associated with directed subsurface irrigation. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 806-811. St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Bryla, R.D., S. Gary, S.G. Bañuelos and P.J. Mitchell, 2003. Water requirements of subsurface drip-irrigated faba bean in California. *Irrig. Sci.* 22:31-37.
- Bucks, D.A., L.J. Erie, O.F. French, F.S. Nakayama and W.D. Pew, 1981. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. *ASAE Trans.* 24(6):1482-1489.
- Bucks, D.A., F.S. Nakayama and A.W. Warrick, 1982. Principles, practices and potentialities of trickle (drip) irrigation. In "Advances in irrigation" (D. Hillel, ed.), Vol. I. Academic Press, New York. pp. 219-298.
- Bui, W., and R.V. Osgood, 1990. Subsurface irrigation trial for alfalfa in Hawaii. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28 - November 1, Phoenix, Arizona, pp. 658-660, ASAE.
- Burt, C.E., 1995. Is buried drip the future with permanent crops? *Irrig. Business Technol.* 3(1):20-22.
- Busch, C.D. and W.R. Kneebone, 1966. Subsurface irrigation with perforated plastic pipe. *ASAE Trans.* 9(1):100-101.
- Busscher, W.J., 1982. Improved growing conditions through soil aeration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 13 (5):401-409.
- Caldwell, D.S., W.E. Spurgeon and H.L. Manges, 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip-irrigated corn. *ASAE Trans.* 37(4):1099-1103.
- Camp, C.R., 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *ASAE Trans.* 41(5):1353-1367.
- Camp, C.R., E.J. Sadler and W.J. Busscher, 1989. Subsurface and alternate-middle micro irrigation for the southeastern coastal plain. *ASAE Trans.* 32(2):451-456.
- Camp, C.R., J.T. Garrett, E.J. Sadler and W.J. Busscher, 1993. Microirrigation management for double-cropped vegetables in a humid area. *ASAE Trans.* 36(6):1639-1644.
- Camp, C. R., P. J. Bauer and P. G. Hunt, 1997a. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern Coastal Plain. *ASAE Trans.* 40(4):993-999.
- Camp, C.R., E.J. Sadler and W.J. Busscher, 1997b. A comparison of uniformity measures for drip irrigation systems. *ASAE Trans.* 40(4):1013-1020.
- Camp, C.R., P.J. Bauer and W.J. Busscher, 1999. Evaluation of no-tillage crop production with subsurface drip irrigation on soils with compacted layers. *ASAE Trans.* 42(4):911-917.
- Carter, J.N., M.E. Jensen and D.J. Traveller, 1980. Effect of mid to late season water stress on sugar beet growth and yield. *Agronomy J.* 72: 806-815.

- Cassel, D.K. and A. Bauer, 1976. Irrigation schedules for sugarbeets on medium and coarse textured soils in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 68, 45-8.
- Charlesworth, P.B. and W.A. Muirhead, 2003. Crop establishment using subsurface drip irrigation: a comparison of point and area sources. *Irrig. Sci.* 22:171-176.
- Chase, R.G., 1985a. Phosphorus application through a subsurface trickle system. In Drip/Trickle Irrigation in Action, *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, November 18-21, Fresno, California, 1: 393-400. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Chase, R.G., 1985b. Subsurface trickle irrigation in a continuous cropping system. In Drip/Trickle Irrigation in Action, *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 2: 909-914. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Clark, G.A., C.D. Stanley, D.N. Maynard, G.J. Hochmuth, E.A. Hanlon and D.Z. Haman. 1991. Water and fertilizer management of microirrigated fresh market tomatoes. *ASAE Trans.* 34(2):429-435.
- Coelho, F.E. and D. Or, 1996. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60(4):1039-1049.
- Coelho, R.D. and R.S. Resende, 2005. Vacuum effects on the hydraulics of subsurface drip irrigation (SDI) of sugar cane. *ASAE Paper* No. 052245. St. Joseph, Mich.:ASAE.
- Colaizzi, P.D., A.D. Schneider, S.R. Evett and T.A. Howell, 2004. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. *ASAE Trans.* 47(5):1477-1492.
- Colaizzi, P.D., S.R. Evett and T.A. Howell, 2006. SDI bed design comparison for soybean emergence and yield. *ASABE Paper* No. 062279. St. Joseph, Mich.: ASABE.
- Cook, F.J., P.J. Thorburn, P. Fitch and K.L. Bristow, 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrig. Sci.* 22:129-134.
- Cote, C.M., K.L. Bristow, P.B. Charlesworth, F.J. Cook and P.J. Thorburn, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22:143-156.
- Daigger L., W. Trimmer and D. Yonts, 1979. Effect of soil aeration on plants. *Report*, University of Nebraska, Panhandle Station.
- Davidoff, B. and R.J. Hanks, 1989. Sugar beet production as influenced by limited irrigation. *Irrig. Sci.* 10:1-17.
- Davis, K.R., C.J. Phene, R.L. McCormick, R.B. Hutmacher and D.W. Meek, 1985. Trickle frequency and installation depth effects on tomatoes. In Drip/Trickle Irrigation in Action, *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 2: 896-902. St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Davis, R., and R. Hirji, 2003. *Water Resource and Environment: Irrigation and Drainage Rehabilitation*. World Bank, Washington.
- Davis, S., 1967. Subsurface irrigation - How soon a reality? *Agricultural Engineering* 48(11): 654-655.
- Davis, S. and S.D. Nelson, 1970a. Subsurface irrigation today and tomorrow in California. In *Proc. Nat. Irrigation Symp.*, H1-H8. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Davis, S. and S.D. Nelson, 1970b. Subsurface irrigation easily automated. *J. Irrig. Drain. Div., ASCE* 96(IR1): 47-51.
- Davis, S. and W.J. Pugh, 1974. Drip irrigation: Surface and subsurface compared with sprinkler and furrow. In *Proc. 2nd Int'l Drip Irrigation Congress*, 109-114. Riverside, Calif.: University of California.
- De Jesus Jr., W.C., F.X.R. do Vale, R.R. Coelho and L.C. Costa, 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy J.* 93: 989-991.
- Dehghanisanij, H., T. Yamamoto, V. Rasiah, J. Utsunomiya and M. Inoue, 2004. Impact of biological clogging agents on filter and emitter discharge characteristics of microirrigation systems. *Irrigation and Drainage Journal*, ICID, 53:363-373.
- DeTar, W.R., G.T. Browne, C.J. Phene, and B.L. Sanden, 1996. Real-time irrigation scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 812-824. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Devitt, D.A. and W.W. Miller, 1988. Subsurface drip irrigation of bermudagrass with saline water. *Applied Agric. Res.* 3(3):133-143.
- Dhuyvetter, K.C., F.R. Lamm and D.H. Rogers, 1995. Subsurface drip irrigation (SDI) for field corn - An economic analysis. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 395-401. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Dirksen, C., 1978. Transient and steady flow from subsurface line sources at constant hydraulic head in anisotropic soil. *ASAE Trans.* 21(5):913-919.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24* (rev.). FAO, Rome, Italy, 144 pp.
- Draycott, A.P. and A.M. Messer, 1977. Response by sugar beet to irrigation, 1965-75. *J. Agricultural Science, Cambridge* 89:481-493.
- Dukes, M.D. and J.M. Scholberg, 2005. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. *Appl. Eng. in Agric.* 21(1):89-101.
- Dunham, J.R., 1993. Water use and irrigation. In *The Sugar Beet Crop*, pp. 279 - 309. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.

- Earl, H.J. and R.F. Davis, 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy J.* 95: 688-696.
- Edwards, D.M., J.D. Eastin, R.A. Olson and R. German, 1970. Subsurface irrigation today and tomorrow in the Midwest. In *Proc. Nat. Irrigation Symp.*, G1-G11. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Ehlig, C.F. and R.D. LeMert, 1979. Water use and yields of sugarbeets over a range from excessive to limited irrigation. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 43:403-407.
- El-Gindy, A.M. and A.M. El-Araby, 1996. Vegetable crop response to surface and subsurface drip under calcareous soil. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 1021-1028. St. Joseph, Mich.: ASAE
- Enciso, J.M., B.L. Unruh, J.C. Henggeler and W.L. Multer, 2002. Effect of row pattern on water use efficiency for subsurface drip irrigated cotton. *ASAE Trans.* 45(5):1397-1403.
- Enciso, J.M., B.L. Unruh, P.D. Colaizzi and W.L. Multer, 2003. Cotton response to subsurface drip irrigation frequency under deficit irrigation. *Appl. Eng. in Agric.* 19(5):555-558.
- Everard, J.D., 1985. *The physiology of plants subjected to oxygen deficient rooting environments*. PhD thesis, University of Reading, Reading, UK. pp. 238.
- Evelt, S.R., T.A. Howell and A.D. Schneider, 1995. Energy and water balances for surface and subsurface drip irrigated corn. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 135-140. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Evelt, S.R., T.A. Howell, A.D. Schneider, D.R. Upchurch and D.F. Wanjura, 1996. Canopy temperature based automatic irrigation control. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 207-213. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Evelt, S.R., T.A. Howell, A.D. Schneider, D.R. Upchurch and D.F. Wanjura, 2000. Automatic drip irrigation of corn and soybean. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 401-408. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Fabeiro, C., F. Martín de Santa Olalla, R. López and A. Domínguez, 2003. Production and quality of the sugar beet (*Betavulgaris* L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agric. Water Mgt.* 62:215-227.
- Fangmeier, D.D., D.J. Garrot Jr., S.H. Husman and J. Perez, 1989. Cotton water stress under trickle irrigation. *ASAE Trans.* 32(6):1955-1959.
- FAO, 2002. *World Agriculture: Towards 2015/2030*. Summary Report. Global Perspectives Unit, FAO, Rome, Italy. pp. 108.

- Felsot, A.S., R.G. Evans and L.C. Tallman, 2000. Soil distribution and plant uptake of imidacloprid under drip and furrow irrigation. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 416-427. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Fletcher, R., and C.M. Reeves, 1964. Function minimization by conjugate gradients, *Computer Journal*, 7:149-154.
- Fick, G.W., R.S. Loomis and W.A. Williams, 1975. Sugar beet. In *Crop Physiology* (ed. L.T. Evans), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 259-95.
- Framji, K.K., B. Garg and S.D. Luthra, 1982. Irrigation and Drainage in the World: A Global Review, Vol II, International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi.
- Gardner, C.M.K., J.P. Bell, J.D. Cooper, T.J. Dean, N. Gardner and M.G. Hodnett, 1991. Soil water content. In: *Soil analysis: physical methods*, K. A. Smith, C. E. Mullins (Eds), Marcel Dekker, Inc, New York, USA, p. 1-73.
- Ghariani, S.A., 1981. *Impact of variable irrigation water supply on yield- determining parameters and seasonal water-use efficiency of sugar beets*. PhD Thesis, University of California, Davis. 153 pp.
- Gibson, W., 1974. Hydraulics, mechanics and economics of subsurface and drip irrigation of Hawaiian sugarcane, 2: 639-648. In *Proc. 15th Congress Int'l Society Sugar Cane Technol.* Honolulu, Hawaii: Hawaiian Sugar Planters' Assoc.
- Gilley, J.R. and E.R. Allred, 1974a. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals. *ASAE Trans.* 17(5):927-933.
- Gilley, J.R. and E.R. Allred, 1974b. Optimum lateral placement for subsurface irrigation systems. In *Proc. 2nd Int'l Drip Irrigation Congress*, 234-239. Riverside, Calif.: Univ. Calif.
- Goldberg, D. and M. Shmueli, 1970. Drip irrigation - A method used under arid and desert conditions of high water and soil salinity. *ASAE Trans.* 13(1):38-41.
- Goldberg, D., B. Gornat and Y. Bar, 1971. The distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. *J. of the Am. Soc. for Horticultural Science*, 96:645-648.
- Goldberg, D., B. Gornat and D. Rimon, 1976. *Drip Irrigation - Principles, Design and Agricultural Practices*. Kfar Shmaryahu, Israel: Drip Irrigation Scientific Publications.
- Goorahoo, D., G. Carstensen and A. Mazzei, 2001. A pilot study on the impact of air injected into water delivered through subsurface drip irrigation tape on the growth and yield of bell peppers. CATI Pub. No. 010201, California State University, Fresno.

- Grattan, S.R., L.J. Schwankl and W.T. Lanini, 1990. Distribution of annual weeds in relation to irrigation method. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28- November 1, Phoenix, Arizona, pp. 148-153, ASAE.
- Grimes, D.W., D.S. Munk and D.A. Goldhamer, 1990. Drip irrigation emitter depth placement in a slowly permeable soil. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28 - November 1, Phoenix, Arizona, pp. 248-254, ASAE.
- Gushiken, E.C., 1995. Irrigating with reclaimed water through permanent subsurface drip irrigation systems. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 269-274. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hachum, A.Y., J.F. Alfaro and L.S. Willardson, 1976. Water movement in soil from trickle source. *J. Irrig. and Drain. Division, ASCE*, (102):179-192.
- Haddock, J.L., S.A. Taylor, and C.H. Milligan, 1974. Irrigation, fertilization, and soil management of crops in rotation. Utah Agricultural Experiment Station, Utah State University, Logan, Bulletin 49, 33 pp.
- Hang, A.N. and D.E. Miller, 1986a. Responses of sugar beet (*Beta vulgaris*) to deficit, high-frequency sprinkler irrigation: I. Sucrose accumulation, and top and root dry matter production. *Agronomy J.* 78(1):10-14.
- Hang, A. N. and D. E. Miller, 1986b. Responses of sugar beet (*Beta vulgaris*) to deficit, high-frequency sprinkler irrigation: II. Sugar beet development and partitioning to root growth. *Agronomy J.* 78(1):15-18.
- Hanson, B. and S. Kaffka, 2002. The use of drip irrigation for sugarbeet production. University of California, Davis.
- Hanson, B.R., and D.M. May, 2000. Response of processing tomato yield to drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 385-390. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hanson, B.R. and D.M. May, 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric. Water Mgt.* 68(1):1-17.
- Hanson, B.R., D.M. May and W.E. Bendixen, 1997. Wetting patterns under surface and subsurface drip irrigation. ASAE Paper No. 97-2178. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hanson, B.R., G. Fipps and E.C. Martin, 2000. Drip irrigation of row crops: What is the state of the art? In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 391-400. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hanson, B. R., G. Fipps, E.C. Martin, 2002. *Drip irrigation of row crops: What is the state of the art*. Vol. 2002. Kansas State University.

- Hanson, E.G. and T.C. Patterson, 1974. Vegetable production and water-use efficiency as influenced by drip, sprinkler, subsurface, and furrow irrigation methods. In *Proc. 2nd Int'l Drip Irrigation Congress*, 97-102. Riverside, Calif.: University of California.
- Hanson, E.G., B.C. Williams, D.D. Fangmeier and O.C. Wilke, 1970. Influence of subsurface irrigation on crop yields and water use. In *Proc. Nat. Irrig. Symp.*, pp. D1-D13. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Harvey, W.C. and V.J. Dutton, 1993. *Root quality and processing*. In *The Sugar Beet Crop*. pp. 571-617. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.
- Hawatmeh, N. and A. Battikhi, 1983. Wetting fronts under a trickle source in two soils of the Jordan valley. *Dirasat*, 10(1):17-31.
- Henderson, D.W., F.J. Hills, R.J. Loomis, and E.F. Nourse, 1968. Soil moisture conditions, nutrient uptake and growth of sugarbeets as related to method of irrigation of an organic soil. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists*, 15:35-48.
- Henggeler, J.C., 1995. A history of drip-irrigated cotton in Texas. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 669-674. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Henggeler, J., J. Kinnibrough, W. Multer, D. Kight and R. Scott, 1996. Economic impact resulting from the adoption of drip irrigation cotton. Result Demonstration Report. College Station, Tex.: Texas Agric. Ext. Serv., Texas A&M University.
- Hestenes, M.R. and E. Stiefel, 1952. Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 49(6):409-436.
- Heuberger, H., Livet, J., and Schnitzler, W., 2001. Effect of soil aeration on nitrogen availability and growth of selected vegetables - preliminary results. In "International Conference on Environmental Problems of Nitrogenous Fertilizer" (C. R. Rahn, ed.), Vol. 563, *Acta Horticulturae*, pp. 147-154. International Society of Horticulture Science.
- Herr, E.M. and W.M. Jarrel, 1980. Response of Chrysanthemum to urea peroxide. *HortScience* 15: 501-502.
- Hexem, R.W. and C.F. Heady, 1978. *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa. 215 pp.
- Higgins, G.M., P.J. Dieleman and C.L. Abernethy, 1987. Trends in irrigation development and their implications hydrologists and water resources engineers. *J. of Hydrology Research* 25:393-406.

- Hiler, E.A. and T.A. Howell, 1973. Grain sorghum response to trickle and subsurface irrigation. *ASAE Trans.* 16(4):799-803.
- Hills, D.J., M.A.M. Tajrishy and Y. Gu, 1989. Hydraulic considerations for compressed subsurface drip-tape. *ASAE Trans.* 32(4):1197-1201.
- Hills, F.J., S.R. Winter and D.W. Henderson, 1990. Sugar beet. In *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph no. 30 (eds B.A. Stewart and D.R. Nielsen). American Society of Agronomy, Madison, pp. 795-810.
- Howell, T.A., 2000. Irrigation's role in enhancing water use efficiency. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 66-80. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Howell, T.A., L.H. Ziska, R.L. McCormick, L.M. Burtch and B.B. Fischer, 1987. Response of sugarbeets to irrigation frequency and cutoff on a clay loam soil. *Irrig. Sci.* 8:1-11.
- Howell, T.A., A.D. Schneider and B.A. Stewart, 1995. Subsurface and surface microirrigation of corn – U.S. Southern High Plains. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 375-381. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Howell, T.A., A.D. Schneider and S.R. Evett., 1997. Subsurface and surface microirrigation of corn—Southern High Plains. *ASAE Trans.* 40(3):635-641.
- Hunsaker, D.J., A.J. Clemmens and D.D. Fangmier, 1998. Cotton response to high frequency surface irrigation. *Agric. Water Mgt.* 37:55-74.
- Hurvey, C.W. and J.V. Dutton, 1993. Root quality and processing. In *The Sugar Beet Crop: Science into Practice* (Eds D.A. Cooke and R.K. Scot), pp. 550-617. London: Chapman and Hall.
- Hutmacher, R.B., S.S. Vail, J.G. Muthamia, V. Mwaja and R.C. Liu, 1985. Effect of trickle irrigation frequency and installation depth on tomato growth and water status. In *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 2: 798-804. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hutmacher, R.B., C.J. Phene, K.R. Davis and T.A. Kerby, 1993. Acala and pima cotton responses to subsurface drip irrigation: Water use, plant water relations, and yield. In *Proc. Beltwide Cotton Conf.*, 1221-1224. Memphis, Tenn: Nat. Cotton Council.
- Hutmacher, R.B., C.J. Phene, K.R. Davis, S.S. Vail, T.A. Kerby, M. Peters, C.A. Hawk, M. Keeley, D.A. Clark, D. Ballard and N. Hudson, 1995. Evapotranspiration, fertility management for subsurface drip acala and pima cotton. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 147-154. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Itenfisu, D., R. Elliot, R.G. Allen and I.A. Walter, 2000. Comparison of reference evapotranspiration calculations across a range of climates. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 216-227. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.

- James, L.G., 1988. *Principles of Farm Irrigation System Design*. New York:Wiley.
- Jensen, M.E., W.R. Rangeley and P.J. Dieleman, 1990. Irrigation trends in world agriculture. In "Irrigation of Agricultural Crops" (B. A. Stewart and D. R. Nielsen, eds.), pp. 32-63. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Jnad, I., B. Lesikar, G. Sabbagh and A. Kenimer, 2000. Characterizing soil hydraulic properties in a subsurface drip drain field. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 670-676. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Jnad, I., B. Lesikar, A. Kenimer and G. Sabbagh, 2001. Subsurface drip dispersal of residential effluent: II. Soil hydraulic characteristics. *ASAE Trans.* 44(5):1159-1165.
- Jorgensen, G.S. and K.N. Norum, ed., 1993. *Subsurface Drip Irrigation—Theory, Practices and Application*. CATI Pub. No. 921001. Fresno, CA: California State University, 212 pp.
- Kalfountzos, D., M. Sakellariou-Makrantonaki and C. Tzimopoulos, 2002. Study of soil water movement using time domain reflectometry. In *proc. 17th World Congress of Soil Science*. August 14-21, Bangkok, Thailand, Symposium no. 4, pp. (42)1-9
- Kalfountzos, D., M. Sakellariou-Makrantonaki, C. Tzimopoulos and S. 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.
- Kalfountzos, D., I. Alexiou, S. Kotsopoulos, P. Vyrlas and S. Kampeli, 2004. Evaluation of a subsurface and surface trickle irrigation system applied on cotton plantations in Central Greece. In *proc. of EWRA Symposium on Water Resources Management: Risks and Challenges for the 21st Century*, September 2-4, Izmir, Turkey, pp. 417-427.
- Keller, J. and D. Karmeli, 1974. Trickle irrigation design parameters. *ASAE Trans.* 17:678-684.
- Khalilian, A., M.J. Sullivan and W.B. Smith, 2000. Lateral depth placement and deep tillage effects in a subsurface drip irrigation system for cotton. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 641-646. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Khan, A.A, M. Yitayew and A.W. Warrick, 1996. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *J. of Irrig. and Drain. Eng. ASCE*, 122(4):221-227.
- Knapp, K.C., 1993. Economics of irrigation system investment. In *Subsurface Drip Irrigation—Theory, Practices and Application*, 127-139. CATI Pub. No. 92 1001. Fresno, Calif.: California State University.

- Kohl, R.A. and J.W. Cary, 1969. Sugarbeet yields unaffected by afternoon wilting. *J. of the American Society of Sugar Beet Technologists*, 15:416-21.
- Kotsopoulos, S., D. Kalfountzos, I. Alexiou, G. Zerva, C. Karamaligas and P. Vyrlas, 2003. Actual evapotranspiration and soil moisture studies in irrigated cotton fields. *European Water*, E-Bulletin of European Water Resources Association (EWRA), Issue 3/4:22-28.
- Kruse, E.G. and I. Israeli, 1987. Evaluation of a subsurface drip irrigation system. ASAE Paper No. 87-2034. St. Joseph, Mich.:ASAE.
- Kruse, E.G., D.A. Bucks and R.D. vonBernuth, 1990. Comparison of irrigation systems. *In* Irrigation of agricultural crops (B. A. Stewart and D. R. Neilson, eds.), Vol. Agronomy No. 30, pp. 745-508. ASA, CSSA, SSSA.
- Lamm, F.R., H.L. Manges, L.R. Stone, A.H. Khan, D.H. Rogers, 1995a. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in Northwest Kansas. *ASAE Trans.* 38(2):441-448.
- Lamm, F.R., W.E. Spurgeon, D.H. Rogers and H.L. Manges, 1995b. Corn production using subsurface drip irrigation. *In Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 388-394. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Last, P.J., A.P. Draycott, A.B. Messemer and D.J. Webb, 1983. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation on sugar beet at Broom's Barn 1973-8. *J. of Agricultural Science, Cambridge* 101:185-205.
- Letey, J., 1961. Aeration, compaction and drainage. *California Turfgrass Culture*, 11:17-21.
- Li, J., Zhang, J., Rao, M., 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agric. Water Mgt.* 67:89-104.
- Loomis, R.S. and G.F. Worker, 1963. Responses of sugarbeet to low soil moisture at two levels of nitrogen nutrition. *Agronomy J.* 55:509.
- Lubana, P.P.S., N.K. Narda and L.C. Brown, 2004. Application of a hemispherical model to predict radius of wetted soil volume under point source emitters for trickle irrigated tomatoes in Punjab state, India. ASAE Paper 042243. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Machado, R.M.A., M.R.G. Oliveira and C.A.M. Portas, 2003. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation. *Plant Soil* 255(1):333-341.
- Mambelli, S., M.T. Amaducci, G. Venturi, 1992. The incidence of irrigation on root growth, sugar accumulation and the evolution of melassigenics of sugar beet. IIRB – Commission Mediterranee, pp. 21-28.

- Martin, E.C., D.C. Slack and E.J. Pegelow, 1996. Crop coefficients for vegetables in Central Arizona. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 381-386. St. Joseph, Mich.: ASAE
- McNamara, J.B., 1970. Subirrigation - The basis of tomorrow's agriculture. In *Proc. Nat. Irrigation Symp.*, C1-C13. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Meek, B.D., L.E. Graham and T.J. Donovan, 1981. Effect of irrigation treatments, soil temperature and soil texture on soil aeration status and stand losses of alfalfa. In "73rd annual meeting of American Society of Agronomy, Agronomy abstracts", pp. 216. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Meek, B.D., C.F. Ehlig, L.H. Stolzy and L.E. Graham, 1983. Furrow and trickle irrigation: effects on soil oxygen and ethylene and tomato yield. *Soil Sci. Soc. of America J.* 47:631-635.
- Mikkelsen, R.L., 1989. Phosphorus fertilization through drip irrigation. *J. Prod. Agric.* 2(3): 279-286.
- Milford, G.F.J., 1975. Effects of mist irrigation on the physiology of sugar beet. *Annals of Applied Biology*, 80:247-250.
- Milford, G.F.J., J.M. Armstrong, J.P. Jarvis, J.B. Houghton, M.D. Bellett-Travers, J. Jones and A.R. Leigh, 2000. Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status. *J. of Agricultural Science*, 135:1-10.
- Miller, D.E. and A.N. Hang, 1980. Deficit, high frequency irrigation of sugarbeet with the line source technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1295-1298.
- Mitchell, W.H., 1981. Subsurface irrigation and fertilization of field corn. *Agron. J.* 73(6): 913-916.
- Mitchell, W.H. and D.L. Sparks, 1982. Influence of subsurface irrigation and organic additions on top and root growth of field corn. *Agron. J.* 74(6):1084-1088.
- Mitchell, W.H. and H.D. Tilmon, 1982. Underground trickle irrigation: The best system for small farms? *Crops Soils* 34:9-13.
- Mizyed, N. and E.G. Kruse, 1989. Emitter discharge evaluation of subsurface trickle irrigation systems. *ASAE Trans.* 32(4):1223-1228.
- Moncef, H., H. Daghari, J. Balti and M. Maalej, 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrig. and Drain.* 51: 347-360.
- Moore, R.C. and J.C. Fitschen, 1990. The drip irrigation revolution in the Hawaiian sugarcane industry. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28

- November 1, Phoenix, Arizona, pp. 223-227, ASAE.
- Morillo-Velarde R., H. Delicia y J.C. Martínez, 2001. Técnicas de riego en la remolacha azucarera. Caja España. Valladolid, España, 134 pp.
- Musick, J.T. and D.A. Dusek, 1982. Skip-row planting and irrigation of graded furrows. *ASAE Trans.* 25(1):82-87,92.
- Neibling, H. and R. Brooks, 1995. Potato production using subsurface drip irrigation— Water and nitrogen management. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 656- 663. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Neibling, W.H. and J.J. Gallian, 1997. Irrigation Water Management in Sugarbeet Production. Presented at Sugarbeet Schools on January 27-31, 1997. Also available in <http://www.uidaho.edu/sugarbeet/irrig/irrigbeet.htm>
- Or, D., 1995. Soil water sensor placement and interpretation for drip irrigation management in heterogeneous soil. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 214-221. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Oron, G., 1981. Simulation of water flow in the soil under sub-surface trickle irrigation with water uptake by roots. *Agric. Water Mgt.* 3:179-193.
- Oron, G., Y. DeMalach, Z. Hoffman and R. Cibotaru, 1991. Subsurface microirrigation with effluent. *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE,117(1):25-36.
- Oron, G., Y. DeMalach, L. Gillerman and I. David, 1995. Pear response to saline water application under subsurface drip irrigation. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 97-103. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Oron, G., Y. DeMalach, L. Gillerman, I. David and S. Lurie, 2002. Effect of water salinity and irrigation technology on yield and quality of pears. *Biosystems Engineering* 81(2):237-247.
- Palmer, M. and C. Casburn, 1985. Amino nitrogen analyses – factory experiences. *British Sugar Beet Review* 53:73-76.
- Penman, H.L., 1970. Woburn irrigation, 1960-8. VI: Results for rotation crops. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 75:89-102.
- Phene, C.J., 1974. High-frequency porous tube irrigation for water-nitrogen management in humid regions. In *Proc. 2nd Int'l Drip Irrigation Congress*, 166-171. Riverside, Calif.: University of California.
- Phene, C.J., 1995a. The sustainability and potential of subsurface drip irrigation. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 359-367. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Phene, C.J., 1995b. Research trends in microirrigation. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 6-24. St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Phene, C.J. and D.C. Sanders, 1976. High-frequency trickle irrigation and row spacing effects on yield and quality of potatoes. *Agron. J.* 68(4):602-607.
- Phene, C.J. and O.W. Beale, 1976. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40(3):430-436.
- Phene, C.J. and O.W. Beale, 1979. Influence of twin-row spacing and nitrogen rates on high-frequency trickle-irrigated sweet corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43(6):1216-1221.
- Phene, C.J. and R. Ruskin, 1995. Potential of subsurface drip irrigation for management of nitrate in wastewater. *Proceedings of the 5th International Microirrigation Congress*, April 2-6, Orlando, Florida, pp. 155-167.
- Phene, C.J., R.B. Hutmacher, K.R. Davis, R.L. McCormick and D.W. Meek, 1986. Management and response of subsurface drip-irrigated tomatoes, *Proc. Int'l Round 100 Conf. Micro-irrigation*, vol. III Budapest, Hungary, pp. 49-56.
- Phene, C.J., K.R. Davis, R.B. Hutmacher and R.L. McCormick, 1987. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. *Acta Hort.* 200:101-114.
- Phene, C.J., R.L. McCormick, K.R. Davis, J.D. Pierro and D.W. Meek, 1989. A lysimeter feedback irrigation controller system for evapotranspiration measurements and real time irrigation scheduling. *ASAE Trans.* 32(2):477-484.
- Phene, C.J., R.B. Hutmacher, K.R. Davis and R.L. McCormick, 1990. Water- fertilizer management of processing tomatoes. *Acta Hort.* 277: 137-143.
- Phene, C.J., K.R. Davis, R.B. Hutmacher, B. Bar-Yosef, D.W. Meek and J. Misaki, 1991. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrig. Sci.* 12(2):135-140.
- Phene, C.J., W.R. DeTar and D.A. Clark, 1992a. Real-time irrigation scheduling of cotton with an automated pan evaporation system. *Appl. Eng. in Agric.* 8(6):787-793.
- Phene, C.J., R. Yue, I.P. Wu, J.E. Ayars, R.A. Schoneman and B. Meso, 1992b. Distribution uniformity of subsurface drip irrigation systems. ASAE Paper No. 92-2569, Nashville, TN, 15-18 December. St. Joseph, Mich.: ASAE. 14 pp.
- Phene, C.J., K.R. Davis, R.M. Read, R. Yue, I-Pai Wu and R.B. Hutmacher, 1993. Evaluation of a subsurface drip irrigation system after ten cropping seasons. Presentation, ASAE paper No.932560.
- Phene, R.C., 1996. Real-time irrigation scheduling with automated evaporation pan systems. In *Proc. Int'l Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 1093-1098. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Philip, J.R., 1968. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. *Water Resour. Res.* 4(5): 1039-1047.

- Pier, J.W. and T.A. Doerge, 1995. Concurrent evaluation of agronomic, economic, and environmental aspects of trickle-irrigated watermelon production. *J. Environ. Qual.* 24(1): 79-86.
- Plaut, Z., M. Rom and A. Meiri, 1985. Cotton response to subsurface trickle irrigation. In *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 2: 916-920. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Plaut, Z., A. Carmi and A. Grava, 1996. Cotton root and shoot responses to subsurface drip irrigation and partial wetting of the upper soil profile. *Irrig. Sci.* 16(3):107-113.
- Potter, E., J. Wood and C. Nicholl, 1996. *SunScan Canopy Analysis System*. User Manual, SS1-UM-1.05, DELTA-T DEVICES LTD, Cambridge, England, UK.
- Powell, N.L. and F.S. Wright, 1993. Grain yield of subsurface microirrigated corn as affected by irrigation line spacing. *Agron. J.* 85(6):164-169.
- Raine, S.R., and J.P. Foley, 2002. Comparing Application systems for cotton irrigation - what are the pros and cons? In *Proc. of the 11th cotton conference*. Australian Cotton Growers' Research Association, Brisbane, 13-15 August.
- Reynolds, D.M. and D. E. Elrick, 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and α -parameter using the Guelph Permeameter. *Soil Science* 140: 292-302.
- Rinaldi, M. and A.V. Vonella, 2004. Water use efficiency in sugar beet subjected to different sowing times and irrigation regimes in a Mediterranean environment. In *Proc. 4th Int'l Crop Science Conference*.
- Robelin, M. and M. Mingeau, 1970. Alimentation en eau et croissance de la betterave. *J. of the International Institute for Sugar Beet Research* 5:71-86.
- Romero, P., J. Garcia and P. Botia, 2006. Coat-benefit analysis of a regulated deficit-irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in Southeastern Spain. *Irrig. Sci.* 24(X):175-184.
- Roth, R.L., 1983. Moisture movement from a point source. PhD dissertation, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.
- Rubeiz, I.G., N.F. Oebker and J.L. Stroehlein 1989. Subsurface drip irrigation and urea phosphate fertigation for vegetables on calcareous soils. *J. Plant Nutrition* 12(12): 1457-1465.
- Ruskin, R., 1992. Reclaimed water and subsurface irrigation. ASAE Paper No. 92-2578. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Ruskin, R., P. Van Voris and D.A. Cataldo, 1990. Root intrusion protection of buried drip irrigation devices with slow-release herbicides. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28 - November 1, Phoenix, Arizona, pp. 211-216, ASAE.
- Sadler, E.J., C.R. Camp and W.J. Busscher, 1995. Emitter flow rate changes caused by

- excavating subsurface microirrigation tubing. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F.R. Lamm, 763-768. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., 1997. Water drainage in layered soils. Laboratory experiments and numerical simulation. *Water Res. Mgt*, 11:437-444.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., D. Kalfountzos and P. Vyrlas, 2001. Irrigation water saving and yield increase with subsurface 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., D. Kalfountzos, P. Vyrlas and B. Kapetanos, 2002a. Water saving using modern irrigation methods. *Proc. of Hydrorama 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., D. Kalfountzos and P. Vyrlas, 2002b. Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. *Global Nest: the International Journal*, 4(2-3):85-91.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., N.G. Danalatos, S. Dassios and A. Chatzinikos, 2003a. The Effect of Different Irrigation Methods on Growth and Productivity of Fiber Sorghum in Central Greece. *Proc. of XXX Congress of IAHR* (International Association of Hydraulic Engineering and Research), August 24-29, Thessaloniki, Theme B, pp. 777-784.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., I. Tentas, A. Koliou, D. Kalfountzos and P. Vyrlas, 2003b. Irrigation of ornamental shrubs with treated municipal wastewater. *Proc. of 8th International Conference on Environmental Science and Technology* (CEST), September 8-11, Lemnos, Greece, Vol. B, pp. 707-714.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., P. Vyrlas, E. Knenas, A. Koliou and V. Vardouli, 2004. Landscape irrigation with treated municipal wastewater. *Proc. of Intl. Conf. of Protection and Restoration of the Environment VII*, 28 June-1 July, Mykonos, Greece, (CD-ROM).
- Sakellariou-Maktantonaki, M., D. Papalexis and N. Danalatos, 2005a. The effect of irrigation methods on growth and yield of fiber Sorghum in central Greece. *Proc. of 6th International Conference of European Water Resources Association*, EWRA, 7 – 10 September, Menton, France.
- Sakellariou-Makrantonaki M., E. Tzavela and P. Vyrlas, 2005b. Water conservation by irrigating with municipal liquid wastes. *Proc. of 9th International Conference on Environmental Science and Technology*, September 8-11, Rhodes, Greece, pp. B803-808.

- Sakellariou-Makrantonaki, M., E. Tzavela, P. Vyrlas and C. Tzimopoulos, 2005c. Water conservation by wastewater reuse through modern irrigation systems. *Proc. of 3rd IASME/WSEAS International Conference on Fluid Dynamics and Aerodynamics*, August 20-22, Corfu, Greece.
- Sakellariou-Makrantonaki M., E. Tzavela, P. Vyrlas and C. Tzimopoulos, 2005d. Wastewaters reuse through subsurface drip irrigation. *IASME Transactions*, 6(2):1071-1078.
- 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. *Proc. of 6th 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. *Proc. of the HAICTA International Conference*, September 20-23, Volos, Greece, 433-438.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., A. Soulti, E. Papadakis, P. Vyrlas, 2007. Subsurface drip irrigation of sorghum with treated municipal wastewater. *Proc. of EWRA Symposium on Water Resources Management: New Approaches and Technologies*, June 14-16, Chania, Greece, pp. 353-360.
- Sammis, T.W., 1980. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. *Agron. J.* 72(5):701-704.
- Sharmasarkar, F., S. Sharmasarkar, S.D. Miller, G.F. Vance, R. Zhang, 2001. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets. *Agricultural Water Management*, 46:241-251.
- Scherm, H. and A.H.C. van Bruggen, 1995. Comparative study of microclimate and downy mildew development in subsurface drip and furrow-irrigated lettuce fields in California. *Plant Disease* 79(6):620-625.
- Schultz, B., and D.D. Wrachien, 2002. Irrigation and Drainage Systems: Research and Development in 21st Century. *Irrigation and Drainage* 51:311-327.
- Schwankl, L.J., S.R. Grattan and E.M. Miyao, 1990. Drip irrigation burial depth and seed planting depth effects on tomato germination. In *Visions of the Future, Proc. 3rd Nat. Irrig. Symp.*, October 28 - November 1, Phoenix, Arizona, pp. 682-687, ASAE.
- Scott, K.R. and W.K. Jaggard, 1993. Crop physiology and agronomy. In *The Sugar Beet Crop*. pp. 179-237. D. A. Cooke and R. K. Scott (Eds.). Chapman & Hall, London, UK.

- Scott, K.R. and W.K. Jaggard, 2000. Impact of weather, agronomy and breeding on yields of sugarbeet grown in the UK since 1970. *The Journal of Agricultural Science* 134:341-352.
- Sepaskhah, A.R. and A.A. Kamgar-Haghighi, 1997. Water use and yields of sugarbeet grown under every-other-furrow irrigation with different irrigation intervals. *Agric. Water Mgt.* 34:215-227.
- Shrive, S.C., R.A. McBride and A.M. Gordon, 1994. Photosynthetic and growth responses of two broad-leaf tree species to irrigation with municipal landfill leachate. *J. Environ. Qual.* 23(3):534-542.
- Sinclair, T.R., C.B. Tanner and J.M. Bennet, 1984. Water use efficiency in crop production. *Bioscience* 34:36-40.
- Singh, D.K., T.B.S. Rajput, D.K. Singh, H.S. Sikarwar, R.N. Sahoo and T. Ahmad, 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Mgt.* 83:130-134.
- Smith, M., R.G. Allen, J.L. Monteith, A. Perrier, L.S. Pereira and A. Segeren, 1991. Report on the Expert Consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Land and Water Development Division, United Nations Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy.
- Snyder, R.L., 1985. Hand calculating degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35:353-358.
- Solomon, K.H. and G. Jorgensen, 1992. Subsurface drip irrigation. *Grounds Maintenance* 27(10):24, 26.
- Sutton, B.G., R.J. Stirzaker, C.J. Doney and S.D. English, 1985. Solar powered drip irrigation for vegetables. In *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrig. Congress*, 2: 589-593. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Thomas, A.W., E.G. Kruse and H.R. Duke, 1974. Steady infiltration from line sources buried in soil. *ASAE Trans.* 17(1):125-133.
- Thomas, A.W., H.R. Duke and E.G. Kruse, 1977. Capillary potential distributions in root zones using subsurface irrigation. *ASAE Trans.* 20(1):62-67,75.
- Thompson, T.L., S.A. White, J. Walworth and G.J. Sower, 2003. Fertigation frequency for subsurface drip-irrigated broccoli. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 910-918.
- Tognetti, R., M. Palladino, A. Minnocci, S. Delfino and A. Alvino, 2003. The response of sugar beet to drip and low-pressure sprinkler irrigation in southern Italy. *Agric. Water Mgt.* 60:135-155.
- Tolk, J.A. and T.A. Howell, 2000. Measured and predicted evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three High Plains soils. In *Proc. 4th*

- Nat. Irrig. Symp.*, 554-560. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Tollefson, S., 1985a. The Arizona system: Drip irrigation design for cotton. In *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 1: 401-405. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Tollefson, S., 1985b. Subsurface drip irrigation of cotton and small grains. In *Proc. 3rd Int'l Drip/Trickle Irrigation Congress*, 2: 887-895. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574-582.
- Trooien, T.P., F.R. Lamm, L.R. Stone, M. Alam, D.H. Rogers, G.A. Clark and A.J. Schlegel, 2000. Using subsurface drip irrigation with livestock wastewater. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 379-384. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Tsialtas, T.J. and N. Maslaris, 2004. Effect of N fertilization rate on sugar yield and non-sugar impurities of sugar beets (*Beta vulgaris*) grown under mediterranean conditions. *J. Agronomy & Crop Science* 190:1-10.
- Tsialtas, T.J., T.M. Kassioumi and S.D. Veresoglou, 2001. N-niche spatiotemporal differentiation, ¹⁵N uptake rates and community structure in a Mediterranean grassland. *J. Mediter. Ecol.* 2:93-105.
- van Bavel, C.H.M., J. Ahmed, S.I. Bhuiyan, E.A. Hiler and A.G. Smajstrla, 1973. Dynamic simulation of automated subsurface irrigation systems. *ASAE Trans.* 16(6):1095-1099.
- Viets, F.G. Jr., 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Adv. Agron.* 14:223-264.
- Vukov, K., 1977. *Physics and Chemistry of Sugar-beet in Sugar Manufacture*. Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam.
- Vyrlas, P., 1992. Blockage due to suck-back in buried inline trickle emitters. MSc Thesis, Silsoe College, Cranfield University.
- Vyrlas, P., M. Sakellariou-Makrantonaki and D. Kalfountzos, 2004. The use of emitters as air-relief valves for overcoming suck-back clogging in subsurface drip emitters. *Proc. of the 2nd HAICTA, International Conference on Information Systems & Innovative Technologies in Agriculture, Food and Environment*, March 18-20, Thessaloniki, Greece, Vol. II:171-174.
- Walter, I.A., R.G. Allen, R. Elliot, M.E. Jensen, D. Itenfisu, B. Mecham, T.A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Echings, T. Spofford, M. Hattendorf, R.H. Cuenca, J.L. Wright and D. Martin, 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In *Proc. 4th Nat. Irrig. Symp.*, 209-215. November 14-16, Phoenix, Arizona, St. Joseph, Mich.: ASAE.

- Warrick, A. W. 1974. Time dependent linearized infiltration: I. Point source. *SSSA Proc.* 38(3):383-386.
- Warrick, A. W. 1985. Point and line infiltration – Calculation of the wetted soil surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(6):1581-1583.
- Warrick, A.W. and U. Shani, 1996. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II. Effect on uniformity. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 122(5):296-300.
- Warrick, A.W., D.O. Lomen and A. Amoozegar-Fard, 1980. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(5):911-914.
- Welsh, D.F., U.P. Kreuter and J.D. Byles, 1995. Enhancing subsurface drip irrigation through vector flow. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 688-693. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Wendt, C.W., A.B. Onken, O.C. Wilke, R. Hargrove, W. Bausch and L. Barnes, 1977. Effect of irrigation systems on the water requirement of sweet corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41(4):785-788.
- Whitney, L.F., 1970. Review of subsurface irrigation in the Northeast. In *Proc. Nat. Irrig. Symp.*, pp. F1-F8. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Whitney, L.F. and K.M. Lo, 1969. Plastic orifice inserts for subsurface irrigation. *ASAE Trans.* 12(5):602-607.
- Wilhelm, W.W., K. Ruwe and M.R. Schlemmer, 2000. Comparison of three area leaf index meters in a corn canopy. *Crop Science* 40:1179-1183.
- Winter, S.R., 1988. Influence of seasonal irrigation amount on sugarbeet yield and quality. *J. of Sugar Beet Research* 25:1-9.
- Winter, S.R., 1990. Sugar beet response to nitrogen as affected by seasonal irrigation. *Agronomy J.* 82(5):984-988.
- Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from large shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4:1259–1273.
- Xie, M., U. Kuffner and G.L. Moigne, 1993. *Using water efficiently: Technological options*. World Bank Technical Paper Number 205. pp. 52. World Bank, Washington.
- Yamaguchi, J. and A. Tanaka, 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil Science and Plant Nutrition* 36:483-493.
- Yang, S., J. Logan and D.L. Coffey, 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74:61-74.

- Yue, R., C.J. Phene, F. Dale, J.E. Ayars, R.A. Schoneman, I.-P. Wu and L. Kong, 1993. Field uniformity of subsurface drip irrigation. In *Subsurface Drip Irrigation - Theory, Practices and Application*, 181-183. CATI Pub. No. 921001. Fresno, Calif.: California State University.
- Zachmann, D.W. and A.W. Thomas, 1973. A mathematical investigation of steady infiltration from line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37(4):495-500.
- Zetzsche, J.B. and J.S. Newman, 1966. Subirrigation with plastic pipe. *Agricultural Engineering* 47(1):74-75.
- Zimmer, A.L., M.J. McFarland and J. Moore, 1988. Upward free water movement from buried trickle emitters. ASAE Paper No. 88-2063. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Zoldoske, D.F. and E.M. Norum, 1997. Final Report: Progress report on the Lehman Farms Project: A case study in the conversion of an old vineyard from flood to surface drip (SDI) and subsurface drip (SSDI) irrigation. Center for Irrig. Tech., Pub. No. 970702. Fresno, Calif.: California State University.
- Zoldoske, D.F., S. Genito and G.S. Jorgensen, 1995. Subsurface drip irrigation (SDI) on turfgrass: A university experience. In *Proc. 5th Int'l Microirrigation Congress*, ed. F. R. Lamm, 300-302. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Μέθοδος υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ET_o)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

Η μέθοδο υπολογισμού της ET_o από μετεωρολογικά δεδομένα απαιτούν ποικίλες κλιματικές και φυσικές παραμέτρους. Κάποιες από αυτές μετρώνται άμεσα στους μετεωρολογικούς σταθμούς. Άλλες παράμετροι σχετίζονται με μετρούμενα δεδομένα και μπορούν να προκύψουν με τη χρήση άμεσων ή εμπειρικών σχέσεων. Σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται οι πηγές, οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με την μέθοδο FAO Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [\text{Π:1}]$$

όπου:

ET_o = η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm day⁻¹),

R_n = η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻² day⁻¹),

G = η ροή θερμότητας στο έδαφος (MJ m⁻² day⁻¹),

T = η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m (°C),

u_2 = η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m (m s⁻¹),

e_s = η πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa),

e_a = η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),

$e_s - e_a$ = το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa),

Δ = κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T (kPa °C⁻¹),

γ = η ψυχομετρική σταθερά (kPa °C⁻¹).

Παράμετροι ατμόσφαιρας

Υπάρχουν αρκετές σχέσεις για την εκτίμηση των κλιματικών παραμέτρων. Η επίδραση των βασικών κλιματικών παραμέτρων στην εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκτιμηθεί με τη βοήθεια αυτών των σχέσεων. Κάποιες από αυτές τις σχέσεις απαιτούν παραμέτρους που εκφράζουν ένα ειδικό χαρακτηριστικό της ατμόσφαιρας. Πριν τη μελέτη των τεσσάρων βασικών κλιματικών παραμέτρων, θα συζητηθούν κάποιες παράμετροι της ατμόσφαιρας που απαιτούνται στους υπολογισμούς.

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ), εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται για να μετατραπεί μια μονάδα μάζας νερού σε υδρατμούς σε μια διαδικασία σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας. Η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Σε υψηλή θερμοκρασία, απαιτείται λιγότερη ενέργεια από ότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Καθώς η λ μεταβάλλεται ελάχιστα κάτω από κανονικά θερμοκρασιακά εύρη χρησιμοποιείται μια τιμή 2,45 MJ kg⁻¹. Αυτή είναι η λανθάνουσα θερμότητα για μια θερμοκρασία αέρα περίπου 20°C:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3})T \quad [\text{Π:2}]$$

όπου:

$$T = \text{η θερμοκρασία αέρα (}^\circ\text{C)}.$$

Ψυχομετρική σταθερά

Η ψυχομετρική σταθερά (γ) υπολογίζεται ως:

$$\gamma = \frac{c_p P_a}{\epsilon \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} P \quad [\text{Π:3}]$$

όπου:

$$\gamma = \text{η ψυχομετρική σταθερά } \gamma \text{ (kPa }^\circ\text{C}^{-1}),$$

$$P_a = \text{η ατμοσφαιρική πίεση (kPa),}$$

$$\lambda = \text{η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, 2,45 (MJ kg}^{-1}),$$

$$c_p = \text{η ειδική θερμότητα υγρού αέρα, } 1,013 \cdot 10^{-3} \text{ (MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}),$$

$$\epsilon = \text{ο λόγος του μοριακού βάρους των υδρατμών προς το μοριακό βάρος του ξηρού αέρα} = 0,622.$$

Η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία μιας μονάδας μάζας αέρα κατά έναν βαθμό. Η τιμή της

εξαρτάται από την σύνθεση του αέρα, π.χ. από την υγρασία του. Για μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες μια τιμή του $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Καθώς μια μέση ατμοσφαιρική πίεση χρησιμοποιείται για κάθε τόπο, η ψυχομετρική σταθερά θεωρείται σταθερή για κάθε τόπο.

Ατμοσφαιρική πίεση

Η ατμοσφαιρική πίεση, P_a , δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_a = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad [\text{Π:4}]$$

όπου:

P_a = η ατμοσφαιρική πίεση (kPa),

z = το υψόμετρο επάνω από το επίπεδο της θάλασσας (m).

Θερμοκρασία αέρα

Λόγω της μη-γραμμικότητας των δεδομένων σχετικής υγρασίας που απαιτούνται στην εξίσωση FAO Penman-Monteith, η πίεση υδρατμών για μια συγκεκριμένη περίοδο υπολογίζεται ως ο μέσος μεταξύ της πίεσης υδρατμών στην μέγιστη και την ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αυτής της περιόδου. Η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T_{max}) και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T_{min}) είναι, αντιστοίχως, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα που παρατηρείται κατά τη διάρκεια του 24ώρου, αρχίζοντας από τα μεσάνυκτα. Για λόγους τυποποίησης, η T_{mean} του 24ώρου ορίζεται ως ο μέσος της μέγιστης (T_{max}) και της ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας (T_{min}) παρά ως η μέση τιμή των ωριαίων μετρήσεων:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad [\text{Π:5}]$$

Η θερμοκρασία εκφράζεται σε βαθμούς Κελσίου ($^\circ\text{C}$) ή Fahrenheit ($^\circ\text{F}$). Σε κάποιους υπολογισμούς, απαιτείται μονάδα Kelvin (K), η οποία υπολογίζεται προσθέτοντας 273,16 στην θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς Κελσίου ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$). Η κλίμακες Kelvin και Κελσίου έχουν την ίδια διαβάθμιση.

Υγρασία αέρα

Επειδή δεν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση της πραγματικής πίεσης υδρατμών, η πίεση αυτών προκύπτει από την σχετική υγρασία ή την θερμοκρασία δρόσου. Η σχετική υγρασία μετράται άμεσα από υγρόμετρα. Η μέτρηση βασίζεται στην φύση κάποιων

260 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ΕΤ₀)

υλικών, των οποίων μεταβάλλεται το μήκος με την μεταβολή της υγρασίας του αέρα ή με τη χρήση πυκνωτών, όπου η ηλεκτρική χωρητικότητα μεταβάλλεται με την RH. Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τις παραμέτρους που ακολουθούν.

Μέση πίεση κορεσμού υδρατμών

Καθώς η πίεση υδρατμών στον κορεσμό (e_s), σχετίζεται με την θερμοκρασία του αέρα, μπορεί να υπολογισθεί από την θερμοκρασία του αέρα. Η σχέση εκφράζεται από:

$$e^o(T) = 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad [\text{Π:6}]$$

όπου:

$e^o(T)$ = η πίεση κορεσμού υδρατμών σε θερμοκρασία αέρα T (kPa),

T = η θερμοκρασία του αέρα (°C).

$e[..]$ = 2,7183, η βάση του φυσικού λογαρίθμου, υψωμένη στη δύναμη [..].

Εξαιτίας της μη γραμμικότητας της προηγούμενης εξίσωσης, η μέση πίεση κορεσμού των υδρατμών για μίαν ημέρα, εβδομάδα, δεκαήμερο ή μήνα υπολογίζεται ως η μέση μεταξύ της πίεσης κορεσμού υδρατμών στην μέση ημερήσια μέγιστη και την μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία της περιόδου:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad [\text{Π:7}]$$

Η χρησιμοποίηση της μέσης θερμοκρασίας αέρα αντί της ελάχιστης και μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη εκτίμηση για την μέση πίεση κορεσμού υδρατμών.

Κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, απαιτείται η κλίση (Δ) της σχέσης μεταξύ της πίεσης κορεσμού και της θερμοκρασίας. Η κλίση της καμπύλης σε μια δεδομένη θερμοκρασία δίδεται από:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right)} \right]}{(T+237,3)^2} \quad [\text{Π:8}]$$

όπου:

Δ = η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού των υδρατμών στη θερμοκρασία T (kPa °C⁻¹),

T = η θερμοκρασία του αέρα (°C).

Στην εξίσωση FAO Penman-Monteith, όπου η Δ εμφανίζεται στον αριθμητή και τον παρονομαστή, η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού των υδρατμών υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέση θερμοκρασία αέρα.

Πραγματική πίεση υδρατμών εξαγόμενη από δεδομένα σχετικής υγρασίας

Η πραγματική πίεση υδρατμών (e_a), υπολογίσθηκε από την σχετική υγρασία του αέρα. Από τα διαθέσιμα στοιχεία μέγιστης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας (RH_{max} , RH_{min}) υπολογίσθηκε με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$e_a = \frac{e_0(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e_0(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad [\text{Π:9}]$$

όπου:

e_a = η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),

$e_0(T_{min})$ = η πίεση κορεσμού υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία ημέρας (kPa),

$e_0(T_{max})$ = η πίεση κορεσμού υδρατμών στην μέγιστη θερμοκρασία ημέρας (kPa),

RH_{max} = η μέγιστη σχετική υγρασία (%),

RH_{min} = η ελάχιστη σχετική υγρασία (%).

Έλλειμμα πίεσης υδρατμών ($e_s - e_a$)

Το έλλειμμα πίεσης υδρατμών είναι η διαφορά μεταξύ e_s και της e_a για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία μετράται με πυρανόμετρα. Τα όργανα διαθέτουν έναν αισθητήρα τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο που μετρά την ένταση και την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τις παραμέτρους που ακολουθούν.

Εξωγήινη ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία στο άνω όριο της ατμόσφαιρας (R_a), για κάθε ημέρα του έτους και για διαφορετικά γεωγραφικά μήκη μπορεί να εκτιμηθεί από την ηλιακή σταθερά, την απόκλιση του ηλίου και την εποχή του έτους χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

262 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΩΛΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ΕΤ₀)

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad [\text{Π:10}]$$

όπου:

R_a = η εξωγήινη ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

G_{sc} = η ηλιακή σταθερά ($0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$),

d_r = η σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου (),

ω_s = η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου (rad),

φ = το γεωγραφικό πλάτος (rad),

δ = η απόκλιση του ήλιου (rad).

Το γεωγραφικό πλάτος (φ), εκφράζεται σε ακτίνια και είναι θετικό για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό για το νότιο ημισφαίριο. Η μετατροπή από μοίρες σε ακτίνια δίδεται από:

$$[\text{rad}] = \frac{\pi}{180} [^\circ] \quad [\text{Π:11}]$$

Η σχετική απόσταση γης - ηλίου (d_r) και η κλίση του ηλίου (δ), δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad [\text{Π:12}]$$

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad [\text{Π:13}]$$

όπου:

J = η Ιουλιανή ημέρα του έτους [$J=1, 2, \dots, 365$ (366)], (ο αριθμός της ημέρας του έτους μεταξύ 1 Ιανουαρίου και 31 Δεκεμβρίου).

Η γωνία της ώρας δύσης του ηλίου (ω_s), δίδεται από:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad [\text{Π:14}]$$

Ηλιακή ακτινοβολία

Αν η ηλιακή ακτινοβολία (R_s) δεν μετράται μπορεί να υπολογισθεί μέσω της σχέσης του Angstrom που συσχετίζει την ηλιακή ακτινοβολία με την εξωγήινη ακτινοβολία και την σχετική ηλιοφάνεια. Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου.

Ακτινοβολία ολικής αιθρίας

Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας ολικής αιθρίας (R_{so}), όταν $n = N$, απαιτείται για τον υπολογισμό της καθαρής μεγάλου κύματος ακτινοβολίας:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad [\text{Π:15}]$$

όπου:

R_{so} = η ακτινοβολίας ολικής αιθρίας ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

z = το υψόμετρο του σταθμού (m).

Καθαρή ηλιακή ή μικρού κύματος ακτινοβολία

Η εισερχόμενη καθαρή ή μικρού κύματος ακτινοβολία (R_{ns}), που εξάγεται από το ισοζύγιο μεταξύ εισερχόμενης και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας δίδεται από:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad [\text{Π:16}]$$

όπου:

R_{ns} = η καθαρή ηλιακή ή μικρού κύματος ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

α = συντελεστής ανακλαστικότητας της καλλιέργειας ή albedo ($\alpha = 0,23$ για την υποθετική καλλιέργεια αναφοράς, αδιάστατος),

R_s = η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$).

Καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία

Η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους (R_{nl}), υπολογίζεται ως:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad [\text{Π:17}]$$

όπου:

R_{nl} = η εξερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

σ = σταθερά Stephan - Boltzman ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ } ^\circ\text{K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)

$T_{max,K}$ = η μέγιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη 24ωρη διάρκεια της ημέρας (K),

$T_{min,K}$ = η ελάχιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (K),

e_a = η πραγματική πίεση των υδρατμών στον αέρα (kPa),

R_s/R_{so} = η σχετική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\leq 1,0$),

R_s = μετρημένη εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

R_{so} = η υπολογισμένη ακτινοβολία ολικής αιθρίας ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$).

Ο λόγος της σχετικής ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους R_s/R_{so} είναι πάντα ≤ 1 .

264 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ET_o)

Καθαρή ακτινοβολία

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (R_n), ισούται με τη διαφορά της εισερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μικρού μήκους (R_{ns}) και της εξερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [\text{Π:18}]$$

Ροή της αισθητής θερμότητας στο έδαφος

Καθώς το μέγεθος της ημερήσιας ροής θερμότητας (G) στο έδαφος κάτω από την επιφάνεια του χλοοτάπητα αναφοράς είναι σχετικά μικρό, μπορεί να αγνοηθεί και έτσι:

$$G \approx 0 \quad [\text{Π:19}]$$

Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου (U_2) μετράται με ανεμόμετρο. Το ανεμόμετρο που χρησιμοποιείται στον μετεωρολογικό σταθμό αποτελείται από κύπελλα που περιστρέφονται με την δύναμη του ανέμου. Μετρώντας τον αριθμό των στροφών σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου για την περίοδο μέτρησης. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, απαιτείται η ταχύτητα ανέμου μετρημένη σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Abstract

Vyrlas, P., 2007. Water saving with application of innovative irrigation systems and its effects on crops' growth. PhD Thesis, University of Thessaly, N. Ionia, Volos, Greece.

The effort for achieving higher efficiency of water application in irrigation resulted in the development of many and various irrigation methods. Drip irrigation is included among the modern irrigation methods and is characterized by high water use efficiency, both in its surface and subsurface application. The subsurface drip irrigation system is a variant of the widespread system of drip irrigation, in which the laterals are placed under the soil surface, instead of placing on the soil surface.

The object of present research was: (i) the comparison of subsurface with surface drip irrigation in terms of water saving and water use efficiency, (ii) the development of a procedure for the calculation of crop's evapotranspiration that takes into account the different physical characteristics of each irrigation method, (iii) the development of innovative techniques of water application through the irrigation system, (iv) the investigation of the probability of enhancing crop's yield by the use of these techniques and (v) the investigation of the relationship between yield and climatic data and irrigation water.

Field experiments were conducted in a sugar beet field of University of Thessaly Experimental Station, where surface and subsurface drip irrigation systems were installed. The experiments took place through a three-year period (2003-2005) in an experimental field with a clay loam soil.

The experimental design included eight treatments in four replications. The treatments that were applied were: i) Surface drip irrigation with continuous water application, ii) Surface drip with intermittent application, iii) Surface drip with low discharge application through gravity, iv) Subsurface drip irrigation with continuous water application, v) Subsurface drip with intermittent application, vi) Subsurface drip with low discharge application through gravity, vii) Subsurface drip irrigation with continuous water application and simultaneous air application through the irrigation

laterals and viii) Subsurface drip irrigation with continuous water application and air application through the irrigation laterals at the end of irrigation.

Subsurface laterals were placed with the use a special plough in a depth of 0,45 m, while laterals' spacing was 1,0 m in both systems. Measurements of soil moisture and leaf area index were taken in the experimental field throughout the season. The hydraulic attributes of soil were also determined and the quantity of water applied in each irrigation was recorded. At the end of each growing period the sugar beets were harvested by hand.

The evapotranspiration (ET) and the irrigation scheduling were calculated according the methodology of FAO-56. The methodology formulated by FAO-56 does not deal with the case of subsurface drip irrigation method. In the present research the absence of wetting of the surface soil when irrigating subsurface was taken into consideration. The final result of this procedure was the important saving of irrigation water that was achieved in subsurface drip compared with surface application. The percentage of water that was conserved for each irrigation period amounted in 13.2% for the year 2003, 11.2% for 2004 and 11.5% for 2005.

The results regarding the growth of sugar beets, reveal that leaf area index (LAI) was influenced temporary by the irrigation method, ranging in lower levels in the treatments irrigated subsurface compared to surface irrigated ones, but than reached almost the levels of surface treatments.

The water application technique had an important effect in crop production. In all three farming periods the intermittent irrigation produced the higher fresh weight of roots. The sugar content did not show systematic differentiation between the treatments, in no one of the periods. Thus, the irrigated with the intermittent technique treatments gave the higher sugar production per unit area for the three years. The non-sugar components content in the roots was not influenced considerably by the irrigation, as shown by the non important and systematic differences between the treatments.

From the elaboration of water use efficiency (WUE) data resulted that subsurface intermittent irrigation is evaluated as the most efficient technique that was applied, as it presented the higher values of WUE for irrigation water efficiency and in total water applied efficiency for all the three years of experimentation.

The change of soil moisture shows that the interrupted irrigation, in both surface and subsurface systems, produced the larger wetted surfaces. The measurements of moisture in soil profile showed that in the case of intermittent irrigation the uniformity of soil moisture was higher compared to that of continuous application.

The wetting front measurements revealed that the horizontal development of the wetting front was increased in the case of intermittent irrigation, in both irrigation methods. In the case of irrigation with low discharge the downward movement of water was greater and the horizontal lower than in the other treatments. The development of wetted diameter with time in the surface intermittent irrigation, is described with a linear equation, instead of the exponential one that is used in the conventional drip irrigation.

The experimental yield data were approached very well by the use of conjugate directions method and a forecasting relation of sugar beets yield were produced associated with the air temperature expressed in degree days, with solar radiation and the irrigation water applied.

This research and the findings that resulted are limited in the crop and the type of soil that was used but it can be supported that the proposed irrigation techniques, can be used from the growers. The systematic evaluation of the proposed methods with more experimental results remains a critical issue, either when intended for practical application or for improvement of the existing knowledge.

