

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος
Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΡΔΕΥΣΗ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

Λιόντας Νικόλαος

Βόλος 2019

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- 1.** Αντωνιάδης Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Εφαρμοσμένη Εδαφολογία».
- 2.** Δαναλάτος Νικόλαος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Γεωργία – Οικολογία Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας».
- 3.** Παπανικολάου Χρήστος, Διδάσκων Π.Δ. 407/80 Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Αρδεύσεις».

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	7
1.1. Γενικά	7
1.2. Πλεονεκτήματα στάγδην άρδευσης	8
1.3. Μειονεκτήματα στάγδην άρδευσης	9
1.4. Ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό	9
1.4.1. Εξατμισοδιαπνοή	9
1.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή καλλιεργειών	10
1.4.3. Μέθοδοι προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής	10
1.4.4. Έμμεσος προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής	11
1.4.5. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς	11
1.4.5.1. Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ	15
2.1. Γενικά	15
2.2. Απαιτήσεις της καλλιέργειας αραβοσίτου	16
2.2.1. Λίπανση	16
2.2.2. Σπορά	17
2.2.3. Άρδευση	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ	19
3.1. Γενικά	19
3.2. Αυτοματισμοί	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	25
4.1. Γενικά	25
4.2. Εγκατάσταση και διεξαγωγή του πειράματος	25
4.3. Σχεδιασμός πειράματος	25

4.4. Περιγραφή Μεθόδων	26
4.4.1. Απλό εξατμισόμετρο τύπου A	26
4.4.2. Penman – Monteith κατά FAO	27
4.4.3. Watermark	28
4.5. Καλλιεργητικές Φροντίδες	29
4.6. Μετρήσεις χαρακτηριστικών της καλλιέργειας	30
4.6.1. Μέτρηση του ύψους των φυτών	30
4.6.2. Μέτρηση της βιομάζας των φυτών	30
4.6.3. Απόδοση σε καρπό	31
4.7. Ποσότητα του νερού άρδευσης	31
4.8. Κλιματικά δεδομένα	32
4.9. Υπολογισμός δόσης άρδευσης	34
4.10. Υπολογισμός ωφέλιμης ή ενεργού βροχόπτωσης (Pe)	35
4.11. Υπολογισμός αποδοτικότητας εφαρμογής της άρδευσης με σταγόνες (EFF)	35
4.12. Υπολογισμός διάρκειας άρδευσης	36
4.13. Υπολογισμός εύρους άρδευσης	37
4.14. Αποδοτικότητα χρήσης νερού	38
4.15. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	40
5.1. Γενικά	40
5.2. Κλιματολογικά δεδομένα	40
5.3. Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους	41
5.4. Εύρος άρδευσης	42
5.5. Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας	43
5.6. Εφαρμοζόμενη ποσότητα και εξοικονόμηση αρδευτικού νερού	44
5.7. Ύψος φυτών	45
5.8. Παραγωγή ξηρής βιομάζας	46
5.9. Παραγωγή σπόρου	47
5.10. Αποδοτικότητα χρήσης νερού	47
5.11. Συζήτηση	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ζωτικής σημασίας είναι η ύπαρξη νερού για κάθε φυτό, για διάφορους λόγους, ο κυριότερος εκ των οποίων είναι ότι το φυτό έχοντας την αναγκαία ποσότητα νερού δεν εισέρχεται σε κατάσταση υδατικής καταπόνησης. Στις μέρες μας, η έλλειψη του νερού που επηρεάζεται αφενός μεν από την υπερκατανάλωση, αφετέρου δε από τη ρύπανση, είναι ολοφάνερη με ανησυχητικά αυξανόμενη τάση. Οι μεσογειακές χώρες είναι ανάμεσα σε εκείνες που υποφέρουν περισσότερο από τις συνέπειές της και το πρόβλημα αναμένεται να οξυνθεί εξαιτίας των επιπτώσεων από την κλιματική αλλαγή. Τόσο η υπερκατανάλωση, όσο και η ρύπανση έχουν τις ρίζες τους στον τρόπο χρήσης-διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η διατήρηση των υδατικών πόρων, κυρίως μέσω της εξοικονόμησης νερού, αποτελεί κεντρική προτεραιότητα για την εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας νερού για τις ανθρώπινες κοινωνίες και τα οικοσυστήματα.

Το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου νερού παγκοσμίως χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, καθώς οι ανάγκες για σίτιση αυξάνονται ολοένα και περισσότερο. Εξαιτίας της άρδευσης, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις με μικρότερο κόστος εισροών και μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος.

Στη χώρα μας το ποσοστό του νερού που διατίθεται για άρδευση κυμαίνεται γύρω στο 87% έναντι του 2-3% που διατίθεται για βιομηχανική και του 13% που διατίθεται για αστική χρήση αντίστοιχα. Για τον λόγο αυτό, έχει ιδιαίτερη βαρύτητα η ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης που διαμορφώνει αυτό το επίπεδο ζήτησης με αποτέλεσμα την διερεύνηση δυνατοτήτων εξοικονόμησης νερού μέσα από κατάλληλες ενέργειες και επεμβάσεις. Ένα μεγάλο ποσοστό, μέχρι και 50% του μεταφερόμενου νερού, χάνεται λόγω της κακής κατάστασης των αρδευτικών δικτύων ή των ακατάλληλων τεχνικών. Την κατάσταση αυτή έρχεται να επιβαρύνει το γεγονός ότι πολλές ξηρικές καλλιέργειες έχουν αντικατασταθεί από υδροβόρες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας υδροβόρας καλλιέργειας είναι και ο αραβόσιτος. Φυτό μεγάλης οικονομικής σημασίας σε πολλά μέρη του κόσμου.

Οι πρακτικές που χρησιμοποιούνταν μέχρι προσφάτως στην καλλιέργεια του αραβόσιτου και γενικότερα στον τομέα των αρδεύσεων διέπονται από αλόγιστη χρήση του αρδευτικού νερού κι αυτό εξαιτίας της έλλειψης σωστού προγραμματισμού που είναι απόρροια του μη ακριβούς προσδιορισμού των αναγκών

σε νερό της καλλιέργειας. Οι σημαντικότεροι παράμετροι που θα πρέπει να εκτιμούνται προκειμένου να υπολογίζονται οι υδατικές απαιτήσεις ώστε να καταρτίζεται σωστά ένα πρόγραμμα άρδευσης είναι η δόση και ο χρόνος εφαρμογής της άρδευσης, ο οποίος καθορίζεται από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και τις βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, καθώς επίσης και η διάρκεια άρδευσης η οποία εξαρτάται από τη διηθητικότητα του εδάφους και την αρδευτική μέθοδο που εφαρμόζεται.

Η εφαρμογή στάγδην άρδευσης είναι μέθοδος άρδευσης, με την οποία το νερό εφαρμόζεται στο έδαφος σε μικρές ποσότητες υπό τη μορφή σταγόνων, έτσι ώστε το κάθε φυτό να εφοδιάζεται, με την απαραίτητη, για την κανονική ανάπτυξη και απόδοση, ποσότητα νερού. Αποτελεί μια αυτοματοποιημένη εναλλακτική μέθοδο άρδευσης, η οποία έχει ως βασικό της στόχο, την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και την αειφόρο ανάπτυξη και σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους εφαρμογής του νερού, την μείωση των απωλειών κατά τη διανομή και χορήγηση του νερού στα φυτά με αύξηση της παραγωγής και την εξοικονόμηση νερού.

Κατά τη διάρκεια του έτους 2017 πραγματοποιήθηκε έρευνα σε πειραματικό αγρό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου, του νομού Μαγνησίας, με κύριους στόχους την εφαρμογή επιφανειακής στάγδην άρδευσης με τη χρήση απλού εξατμισιμέτρου τύπου A και δόση άρδευσης ίση με το 100% της πραγματικής ημερήσιας ETc, με τη μέθοδο Penman-Monteith και δόση άρδευσης ίση με το 100% της πραγματικής ημερήσιας ETc και την εφαρμογή επιφανειακής στάγδην άρδευσης στην οποία εφαρμόστηκε δόση άρδευσης μετρώντας την εδαφική υγρασία με αισθητήρες Watermark.

Απώτερος σκοπός αυτής της έρευνας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της επιφανειακής αυτόματης στάγδην άρδευσης στην ανάπτυξη και απόδοση καλλιέργειας αραβόσιτου εν συγκρίσει με την απλή επιφανειακή στάγδην άρδευση και η αξιολόγηση της αποδοτικότητας και η απόδειξη της εξοικονόμησης της χρήσης του αρδευτικού νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

1.1. Γενικά

Άρδευση ονομάζεται η παροχή νερού στις καλλιέργειες, με τεχνητά μέσα, συμπληρωματικά προς τις βροχοπτώσεις, για την κάλυψη των αναγκών των φυτών (Στρουθόπουλος, 1995).

Οι μέθοδοι άρδευσης μπορούν να ταξινομηθούν κατά διάφορους τρόπους ανάλογα με τα κριτήρια ή χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη, σε κάθε περίπτωση, για την ταξινόμηση.

Έτσι, ανάλογα με το αν η διαβροχή της επιφάνειας του εδάφους είναι ολική ή μερική, διακρίνονται σε μεθόδους ολικής ή τοπικής άρδευσης.

Ανάλογα με τη θέση χορήγησης του νερού σε σχέση προς την επιφάνεια του εδάφους διακρίνονται σε μεθόδους υπόγειας, υπο-επιφανειακής και επιφανειακής άρδευσης. Σημειώνεται ότι η υπόγεια, διαφέρει από την υπο-επιφανειακή, στο ότι μ' αυτήν το νερό χορηγείται σε βαθύτερα στρώματα και ανεβαίνει μετά μέχρι το ριζόστρωμα με τριχοειδή κίνηση, ενώ με την υπο-επιφανειακή, το νερό χορηγείται λίγο κάτω από την επιφάνεια, κατευθείαν μέσα στη ζώνη του ριζοστρώματος.

Ανάλογα με το είδος της ροής, κατά τη διανομή του νερού μέσα στην καλλιέργεια, έχουμε μεθόδους ελεύθερης ροής και μεθόδους ροής υπό πίεση.

Τέλος, ανάλογα με τον τρόπο διανομής του νερού στα φυτά, έχουμε διάφορες μεθόδους, όπως κατάκλυση, αυλάκια, πορώδεις σωλήνες, μικροεκτοξευτήρες, στάγδην κ.λπ..

Το σύνολο των μεθόδων, που υπάγονται στην κατηγορία της τοπικής επιφανειακής άρδευσης με ροή υπό πίεση, αποτελούν τις μεθόδους που συνήθως αποκαλούνται μέθοδοι ή συστήματα τοπικής άρδευσης.

Οι μέθοδοι τοπικής άρδευσης, ανάλογα με το σχήμα της επιφάνειας του εδάφους που διαβρέχουν, διακρίνονται σε μεθόδους σημειακής διαβροχής (π.χ. συστήματα στάγδην), γραμμικής διαβροχής (π.χ. πορώδεις σωλήνες) ή κυκλικής διαβροχής (π.χ. μικροεκτοξευτήρες).

Με τη γενική ονομασία μέθοδοι τοπικής ή μερικής άρδευσης χαρακτηρίζονται οι μέθοδοι εκείνες, που χορηγούν το νερό κατευθείαν στις ζώνες της μεγαλύτερης ριζικής δραστηριότητας των φυτών και μόνον εκεί, αντίθετα από διάφορες παραδοσιακές μεθόδους (κατάκλυση, καταιονισμός), που χορηγούν το νερό σ' ολόκληρη την έκταση που καταλαμβάνει η καλλιέργεια.

Η στάγδην άρδευση χαρακτηρίζεται βασικά από το ότι χορηγεί το νερό στα φυτά με μικρές και συχνές δόσεις (Παπαζαφειρίου και Παπαμιχαήλ, 1996).

Οι μέθοδοι τοπικής άρδευσης προορίζονται να δώσουν λύση στο πρόβλημα της μείωσης του κόστους εφαρμογής του νερού με περιορισμό κυρίως των απαιτούμενων εργατικών χεριών. Αυτό το επιτυγχάνουν με τη μεταφορά και διανομή του νερού στα φυτά με πλήρη, μόνιμα, δίκτυα και κατάλληλους αυτοματισμούς. Γι' αυτό και στην πράξη τα συστήματα τοπικής άρδευσης συνηθίζεται να ονομάζονται από τους αγρότες και τους εγκαταστάτες συστήματα αυτόματης άρδευσης (Keller και Karmeli, 1974).

Η άρδευση αποτελεί μια από τις πιο καθοριστικές καλλιεργητικές εργασίες που λαμβάνουν χώρα στον αγρό, επηρεάζοντας την τελική απόδοση των καλλιεργειών (Παπαζαφειρίου και Παπαμιχαήλ, 1996).

1.2. Πλεονεκτήματα στάγδην άρδευσης

Η παρατηρούμενη ταχύτερη επέκταση της στάγδην άρδευσης, σε διεθνή κλίμακα, οφείλεται αναμφίβολα στα σοβαρά αγρονομικά πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει.

Εξ' αυτών τα κυριότερα είναι τα εξής:

- Οικονομία νερού.
- Οικονομία εργατικών.
- Μείωση των ζιζανίων.
- Εκτέλεση εργασιών κατά τη διάρκεια της άρδευσης.
- Εύκολη και αποτελεσματική λίπανση και εφαρμογή φυτοφαρμάκων.
- Διατήρηση ξηρού φυλλώματος.
- Χρήση χαμηλής ποιότητας αρδεύσιμου νερού.
- Ανεξαρτητοποίηση της άρδευσης από τον άνεμο και το ανάγλυφο του εδάφους.
- Ευνοϊκές συνθήκες υγρασίας.
- Ευνοϊκή επίδραση στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών.

- Σύγχρονη άρδευση μεγαλύτερων εκτάσεων και αξιοποίηση μικρών παροχών.
- Προστασία περιβάλλοντος (www.gaiapedia.gr).

1.3. Μειονεκτήματα στάγδην άρδευσης

Οποσδήποτε τα συστήματα στάγδην άρδευσης αντιμετωπίζονται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό και διάφορα προβλήματα τα οποία αποτελούν μειονεκτήματα για τα συστήματα αυτά. Τα κυριότερα από τα προβλήματα είναι τα εξής:

- Το κόστος της αρχικής εγκατάστασης.
- Εμφράξεις σταλακτήρων.
- Συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος.
- Μηχανικές ζημιές.
- Αδυναμία εφαρμογής αυτού του συστήματος για την προστασία από παγετό (www.gaiapedia.gr).

1.4. Ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό

Οι καλλιέργειες όταν έχουν στην διάθεσή τους νερό χωρίς κανένα περιορισμό, καταναλώνουν ποσότητες οι οποίες ρυθμίζονται από τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα που τις περιβάλλει. Αποτέλεσμα αυτού είναι αύξηση της βλάστησης που δεν σημαίνει κατ' ανάγκη αύξηση της παραγωγής. Οι ανάγκες σε νερό μιας καλλιέργειας πρέπει να προσδιορίζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο οικονομικό αποτέλεσμα. Οι ανάγκες αυτές εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Η εξατμισοδιαπνοή αυτή βασίζεται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και στους φυτικούς συντελεστές που αντιπροσωπεύουν τις ιδιαιτερότητες της κάθε καλλιέργειας (Καλφούντζος, 2002).

1.4.1. Εξατμισοδιαπνοή

Όταν γίνεται αναφορά στην εξατμισοδιαπνοή των διαφόρων καλλιεργειών σημαίνει την απώλεια νερού που παρουσιάζεται υπό μορφή υδρατμών, ως αποτέλεσμα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους.

Ο χρονικός διαχωρισμός της διαπνοής και της εξάτμισης δεν είναι εύκολος αφού οι δύο διεργασίες συμβαίνουν ταυτόχρονα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι κατά τα αρχικά στάδια εγκατάστασης μιας φυτείας, η απώλεια νερού λόγω της εξάτμισης του από την επιφάνεια του εδάφους είναι ιδιαίτερα μεγάλη, ενώ σε μεταγενέστερο στάδιο

όπου η φυτοκάλυψη αυξάνεται, η απώλεια νερού συμβαίνει κυρίως λόγω της διεργασίας της διαπνοής των φυτών. Ποσοστό μεγαλύτερο του 90% της εξατμισοδιαπνοής προέρχεται μόνο από τη διαπνοή της καλλιέργειας, όταν αυτή φτάνει στο στάδιο πλήρους ανάπτυξης και καλύπτει σχεδόν όλη την επιφάνεια του εδάφους.

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας συμβολίζεται διεθνώς με το ακρωνύμιο ETc προερχόμενο από την αγγλική λέξη Evapotranspiration με την ορολογία Evaporation (Εξάτμιση) και Transpiration (Διαπνοή). Ο συντελεστής c ανταποκρίνεται στην έννοια της καλλιέργειας (crop) (Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010).

1.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή καλλιεργειών

Η εξατμισοδιαπνοή διαφέρει μεταξύ των καλλιεργειών, αφού διαφοροποιείται από πολλές παραμέτρους. Μεταξύ άλλων αναφέρονται το φυτικό είδος της καλλιέργειας (βάθος και πυκνότητα του ριζικού συστήματος), το ποσοστό της φυτοκάλυψης του εδάφους, το στάδιο ανάπτυξης της. Επιπρόσθετα, διαφοροποιούν την εξατμισοδιαπνοή και οι κλιματικοί παράγοντες, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου.

Η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών μετριέται σε χιλιοστάμετρα (mm) ανά μονάδα χρόνου. Εκφράζεται ως το ύψος του νερού που χάνεται από μια επιφάνεια και υπολογίζεται με την πιο κάτω σχέση:

$$\text{Ύψος νερού (mm)} = \frac{\text{Όγκος νερού (m}^3\text{)}}{\text{Επιφάνεια (m}^2\text{)}} \times 1000$$

Στη γεωργική πρακτική μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός της ποσότητας του νερού σε όγκο (m³).

Σύμφωνα με την πιο πάνω σχέση η απώλεια νερού ενός χιλιοστού (1 mm=0,001 m), σε επιφάνεια ενός στρέμματος (1000 m²) ισοδυναμεί με απώλεια νερού 1 κυβικού μέτρου (m³) (Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010).

1.4.3. Μέθοδοι προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, άμεσα με μετρήσεις στο χωράφι ή έμμεσα με τη χρήση διαφόρων κλιματολογικών στοιχείων αντιπροσωπευτικών κάθε περιοχής (Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010).

1.4.4. Έμμεσος προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής

Ο έμμεσος προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού πολλοί ερευνητές στο παρελθόν έχουν ασχοληθεί και μελετήσει την επίδραση που έχουν τα κλιματικά στοιχεία μιας περιοχής, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα, η τάση των υδρατμών, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία στην υδατοκατανάλωση μιας καλλιέργειας. Προς τούτο έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και λογισμικά, τα οποία υπολογίζουν την επίδραση του κλίματος σε καλλιέργεια αναφοράς και εν συνεχεία στην υπό μελέτη καλλιέργεια με τη χρησιμοποίηση χαρακτηριστικών φυτικών συντελεστών. Ως τέτοιες να αναφέρουμε τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith, την μέθοδο Blaney-Criddle και την μέθοδο Thornthwait.

Ανεξάρτητα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, πρέπει όπως αρχικά υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_r) και εν συνεχεία να γίνει η εκτίμηση της υπό μελέτης καλλιέργειας χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικό φυτικό συντελεστή καλλιέργειας (K_c) ανάλογα με το στάδιο της βλαστικής περιόδου στο οποίο βρίσκεται. Έχοντας υπόψη τα πιο πάνω, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της πιο κάτω σχέσης:

$$ET_c = K_c \times ET_r$$

όπου:

ET_c : Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (mm)

ET_r : Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm)

K_c : Φυτικός συντελεστής καλλιέργειας.

Να σημειωθεί ότι η πιο πάνω σχέση προσδιορίζει την εξατμισοδιαπνοή (ET_c) καλλιέργειας κάτω από άριστες συνθήκες ανάπτυξης. Θεωρείται δηλαδή ότι η καλλιέργεια έχει στη διάθεσή της όσο νερό χρειάζεται, είναι απαλλαγμένη από εχθρούς και ασθένειες και γενικά ακολουθούνται όλες οι προβλεπόμενες καλλιεργητικές τεχνικές και συνθήκες για την άριστη ανάπτυξή της (Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010).

1.4.5. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις σε νερό μίας «υποθετικής καλλιέργειας», όπως αυτές διαμορφώνονται υπό την επίδραση των

κλιματικών παραγόντων κάθε περιοχής. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς συμβολίζεται διεθνώς ως ETr ή ET_o.

Ως καλλιέργεια αναφοράς επικράτησε να θεωρείται η καλλιέργεια του χλοοτάπητα. Πρόκειται για καλλιέργεια ύψους 8-15 εκ., η οποία αναπτύσσεται δυναμικά, έχοντας δηλαδή στη διάθεσή της όσο νερό χρειάζεται και είναι απαλλαγμένη από ασθένειες, εχθρούς, ζιζάνια. Η τραχύτητα, η πυκνότητα, η φυλλική επιφάνεια αντιπροσωπεύουν χλοοτάπητα ψυχρής εποχής και όμοια με αυτά του αειθαλούς *Lolium perenne* ή της *Festuca arundinacea*.

Καλλιέργειες που διαμορφώνουν το φύλλωμά τους σε χαμηλά επίπεδα, που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του εδάφους, που αναπτύσσονται σε εκτεταμένα χωράφια με επαρκή υγρασία σε όλη τη βλαστική περίοδο, παρουσιάζουν την ίδια εξατμισοδιαπνοή ανεξάρτητα από το είδος στο οποίο ανήκουν. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής εξαρτάται μόνο από τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα.

Εάν μετρηθεί η επίδραση που ασκούν οι κλιματικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ο άνεμος και η ηλιοφάνεια, πάνω στην εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, θα καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των αναγκών σε νερό της υπό μελέτη καλλιέργειας.

Τέτοια όργανα μέτρησης της εξατμίσσης αποτελούν τα εξατμισίμετρα, μεταξύ άλλων το εξατμισίμετρο τύπου A (Class A pan) (Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010).

1.4.5.1. Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς επιβάλλει ένα άνω όριο στις τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής που εκτιμώνται από τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου. Ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς συνήθως υπολογίζονται από διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα με κάποια από τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί, μεταξύ των οποίων υπάρχουν σοβαρές διαφορές (Παπαμιχαήλ κ.ά., 1994, Αλεξίου κ.ά., 2000, Γεωργίου κ.ά., 2000). Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για τις ελληνικές συνθήκες έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές (Papazafiriou, 1996, Παπαμιχαήλ κ.ά., 1994, Paramichail και Terzidis, 1996, Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1996, Αλεξίου και Παμαμιχαήλ, 1996, Kotsopoulos και Babajimopoulos, 1997, Paramichail και Alexiou, 1998, Παπαζαφειρίου, 1999, Παπαμιχαήλ και Γεωργίου, 1999).

Ως εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ET_r , θεωρείται αυτή που προέρχεται από μια υποθετική εκτεταμένη επιφάνεια υγιούς γρασιδιού, που αρδεύεται επαρκώς, έχει ομοιόμορφο ύψος 0,12 m, αναπτύσσεται δυναμικά και σκιάζει πλήρως το έδαφος (Doorenbos και Pruitt, 1977, Allen et al., 1998).

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών, ET_c , αναφέρεται σε καλλιέργειες μεγάλης έκτασης υπό άριστες αγρονομικές συνθήκες και συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Σύμφωνα με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith κατά FAO, η ET_r υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$ET_r = \left[0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_z^0 - e_z) \right] [\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)]^{-1}$$

όπου ET_r είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς χορτοτάπητα σε $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, R_n και G είναι σε $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, γ και Δ είναι σε $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, u_2 είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m σε $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, e_z^0 και e_z είναι σε kPa.

$$\Delta = \frac{4099e_a}{(T + 273,3)^2}$$

$$e_a = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)$$

$$\gamma = \frac{P \cdot c_p}{0,622 \cdot \lambda}$$

$$\lambda = 2,501 - (0,002361 \cdot T)$$

όπου e_a είναι σε kPa, T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, P η βαρομετρική πίεση σε kPa ($P = 101,2882$ kPa), c_p είναι ίσο με $1,003 \cdot 10^{-3} \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

$$R_n = (1 - a)R_s \left(a_c \frac{R_s}{R_{so}} + b_c \right) (a_1 + b_1 e_d^{1/2}) \sigma \frac{(T_{kmax}^4 + T_{kmin}^4)}{2}$$

όπου $a = 0,23$, $a_c = 1,35$, $b_c = -0,35$, $a_1 = 0,34$, $b_1 = -0,14$, $e_d = 1,56$ kPa, $T_{kmax} = (273,15 + T_{max})$ και $T_{kmin} = (273,15 + T_{min})$ σε $^{\circ}\text{K}$ και όπου R_s και R_{so} είναι αντίστοιχα η ηλιακή ακτινοβολία και η ακτινοβολία ολικής αιθρίας σε $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ και T_{max} και T_{min} η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αντίστοιχα σε $^{\circ}\text{C}$. Το R_{so} υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1. Μέσες ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ολικής αιθρίας, R_{so} , σε $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, για διάφορα βόρεια γεωγραφικά πλάτη.

Μήνας	Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος			
	30°	35°	40°	45°
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Ιανουάριος	17,46	14,95	12,27	9,34
Φεβρουάριος	21,65	19,55	17,04	14,36
Μάρτιος	25,96	24,58	22,90	20,64
Απρίλιος	29,85	29,31	28,34	27,21
Μάιος	32,11	32,11	32,11	31,53
Ιούνιος	33,20	33,49	33,49	33,37
Ιούλιος	32,66	32,95	32,66	32,36
Αύγουστος	30,44	30,14	29,18	28,05
Σεπτέμβριος	26,67	25,25	23,74	22,06
Οκτώβριος	22,48	20,52	18,42	16,04
Νοέμβριος	18,30	15,91	13,52	10,89
Δεκέμβριος	16,04	13,52	10,76	8,25

$$G = 0,38(T_{day,i} - T_{day,i-1})$$

όπου T_{day} η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C.

$$e_z^0 - e_z = \frac{1}{2} [e_z^0(T_{max}) + e_z^0(T_{min})] - e_d$$

όπου

$$e_z^0(T_{max}) = 3,38639[(7,38 \cdot 10^{-3}T_{max} + 0,8072)^8 - 1,9 \cdot 10^{-5}|1,8T_{max} + 48| + 1,316 \cdot 10^{-3}]$$

$$e_z^0(T_{min}) = 3,38639[(7,38 \cdot 10^{-3}T_{min} + 0,8072)^8 - 1,9 \cdot 10^{-5}|1,8T_{min} + 48| + 1,316 \cdot 10^{-3}]$$

και $e_d = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_{min}}{T_{min}+237,3}\right)$ (Παπαζαφειρίου, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ

2.1. Γενικά

Ο αραβόσιτος κατάγεται από το Μεξικό και την Κεντρική Αμερική. Αν και τροπικής καταγωγής, αντέχει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες καθώς έχει υποστεί γενετική βελτίωση σε μεγάλα υψόμετρα. Ο βιολογικός κύκλος του παρουσιάζει μεγάλη παραλλακτικότητα (2 έως 16 μήνες) και ανάλογα του βιολογικού του κύκλου καθορίζεται και η απόδοση. Γενικά η μέση στρεμματική του απόδοση κυμαίνεται από 300kg/στρ. έως 1800kg/στρ.. Καλλιεργείται κυρίως στις Η.Π.Α. στην Ευρώπη (Ιταλία, Ουγγαρία) και την Ασία (Κίνα, Ινδία). Στην Ελλάδα μεταφέρθηκε περί το 1600 μ.Χ. από τη Β. Αφρική (Αραβία) γι' αυτό και ονομάστηκε Αραβόσιτος (η σίτος των Αράβων). Στην Ελλάδα πρόκειται για το πιο σημαντικό εαρινό σιτηρό και καλλιεργείται κυρίως στη Μακεδονία, τη Θράκη, την Πελοπόννησο και τη Θεσσαλία. Μαζί με το σιτάρι και το βαμβάκι, καταλαμβάνουν περισσότερο από το 40% της ελληνικής αρόσιμης γης. Η καλλιεργούμενη έκταση το 2013 για την Ελλάδα ήταν 2132,6 χιλιάδες στρέμματα με την απόδοσή του να αγγίζει τα 2275,2kg, σύμφωνα με την Ετήσια Γεωργική Στατιστική Έρευνα της ΕΛΣΤΑΤ. Η απόδοσή του συγκαταλέγεται ανάμεσα στις μεγαλύτερες της Ευρώπης, παρόλο που οι συνθήκες στην Ελλάδα δεν θεωρούνται πολύ ευνοϊκές για την καλλιέργειά του, κυρίως από άποψη βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με τις υψηλές απαιτήσεις του σε νερό. Χρησιμοποιείται ως επίσπορη αλλά και ως σανοδοτική καλλιέργεια (Γαλανοπούλου-Σενδούκα, 1998).

Το κυρίως ριζικό σύστημα εισχωρεί σε βάθος 75cm με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στα επιφανειακά στρώματα, ενώ οι εμβρυακές ρίζες μπορεί να φθάσουν και σε βάθος 1,5m. Το στέλεχος είναι κάλαμος συμπαγής, κυλινδρικός, με ύψος που κυμαίνεται μεταξύ 0,6m και 4m. Τα φύλλα είναι χωρίς ωτία, με πεπλατυσμένα ελάσματα που φέρουν ανεπτυγμένο κεντρικό νεύρο και δυσδιάκριτες κάθετες νευρώσεις.

Ο βασικός τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο οδοντωτός. Είναι ο πλέον παραγωγικός και περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος. Τύποι για άλλες χρήσεις είναι οι σκληρόκοκκος, ο γλυκός, ο μικρόκοκκος, ο αλευρώδης και ο κηρώδης (www.minagric.gr).

2.2. Απαιτήσεις της καλλιέργειας αραβοσίτου

2.2.1. Λίπανση

Λόγω της υψηλής παραγωγικότητάς του σε βιομάζα και καρπό, ο αραβόσιτος απορροφά μεγάλες ποσότητες ανόργανων θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος το οποίο εξαντλεί. Κατά συνέπεια, η διατήρηση της παραγωγικότητας της καλλιέργειας σε υψηλά επίπεδα προϋποθέτει τον επαρκή εφοδιασμό του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία.

Έχει μεγάλες ανάγκες σε N, P, K, Ca, Mg και S. Ακόμη, διάφορα άλλα ιχνοστοιχεία είναι αναγκαία. Επίσης αντιδρά έντονα στη λίπανση με κόπρο.

Από πειράματα του Ινστιτούτου Σιτηρών έχει προκύψει ότι για την παραγωγή 1000 κιλών ανά στρέμμα καρπού, απαιτούνται ανά στρέμμα: 19,4kg N, 2,7kg P, 13,8kg K, 1,4kg Mg, 2,7kg Ca και μικροποσότητες ιχνοστοιχείων.

Πίνακας 2.1. Συνολική ποσότητα πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων για παραγωγή 1000 κιλών καρπού αραβόσιτου ανά στρέμμα.

Θρεπτικό στοιχείο	Ποσότητα πρόσληψης
<i>Κύρια στοιχεία</i>	
Άζωτο (N)	18-20 kg
Φώσφορος (P)	3,0-3,5 kg
Κάλιο (K)	15-18kg
<i>Δευτερεύοντα στοιχεία</i>	
Ασβέστιο (Ca)	2,6-2,7 kg
Μαγνήσιο (Mg)	1,4-1,5 kg
Μαγγάνιο (Mn)	30-35 gr
Ψευδάργυρος (Zn)	30-35 gr
Σίδηρος (Fe)	110-130 gr
Βόριο (B)	15-20 gr
Χαλκός (Cu)	5-7 gr

Σήμερα, τα νέα απλά υβρίδια μπορούν να δώσουν αποδόσεις από 1500 έως 2000kg/στρ.. Γι' αυτό το λόγο απαιτούν μεγαλύτερα ποσά λιπάσματος και νερού, με το ποσοστό αξιοποίησεως να είναι σημαντικά ανώτερο. Έτσι, ο δείκτης συγκομιδής στα σημερινά υβρίδια ανέβηκε στο 45-60%.

Κατά τη σπορά ή λίγο πριν, προστίθενται σε όλο τον αγρό ή σε γραμμές (για οικονομία λιπάσματος) το σύνολο του φωσφόρου και του καλίου και περίπου το 50% της συνολικής ποσότητας του αζώτου σε αμμωνιακή μορφή.

2.2.2. Σπορά

Για την παραγωγή σπόρου αν οι εδαφοκλιματικές συνθήκες είναι ιδανικές προτείνονται 7000 με 8000 φυτά ανά στρέμμα ενώ όταν το τελικό προϊόν προβλέπεται για ενσίρωμα προτείνονται 500 με 750 φυτά επιπλέον (Iowa State University, 2001). Άλλες αναφορές κάνουν λόγο για πυκνότητα φυτών 6250 με 7500 φυτά ανά στρέμμα (Hannaway και Larson, 2004). Σε πειράματα δοκιμών οι Gökmen et al. (2001) αναφέρουν ότι η δόση σποράς όπου προκύπτουν 7000 φυτά ανά στρέμμα είναι ιδανική καθώς προκύπτει η μεγαλύτερη απόδοση σε σπόρο. Οι Elmore και Abendroth (2008) προσθέτουν ότι η μέγιστη παραγωγή επέρχεται με πυκνότητα σποράς 9000 σπόρων ανά στρέμμα. Για αρδευόμενες εκτάσεις σύμφωνα με τον Lee (2009) προτείνονται 8000-8500 σπόροι ανά στρέμμα ενώ για μη αρδευόμενες συνθήκες ως 7500 σπόρους ανά στρέμμα το πολύ ενώ παρόμοιες είναι και οι πυκνότητες που αναφέρει ο Johnson (2011) ο οποίος αναφέρει ότι η δόση σποράς πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα και με την υφή του εδάφους. Επίσης ο Allen (2012) αναφέρει ότι για παραγωγή βιομάζας πρέπει να επιδιώκονται ακόμα μικρότερες πυκνότητες σποράς για την ικανοποιητική απόδοση σε βιομάζα. Τέλος η δόση σε κιλά σπόρου είναι περίπου 900 με 1100g/στρ. (FAO, 2005).

Ο Onyangο (2009) μελέτησε αποστάσεις φύτευσης και παρατήρησε ότι όσο μικρύναν οι αποστάσεις αυξανόντουσαν οι αποδόσεις σε σπόρο (εύρος 50-70cm) ενώ όμοια σε αποστάσεις 40cm οι Turgut et al. (2005) βρήκαν μεγαλύτερες αποδόσεις σε βιομάζα. Ο Brandley (2005) παρουσιάζει πλήθος αναφορών όπου τονίζεται ότι η πυκνή φύτευση καλαμποκιού (κάτω των 75cm) επιφέρει μεγαλύτερες αποδόσεις και μειωμένο ανταγωνισμό ζιζανίων.

2.2.3. Άρδευση

Σε κάθε περίπτωση η επίδραση της άρδευσης είναι σημαντική και απαραίτητη για τον καθορισμό των αποδόσεων στον αραβόσιτο (Nagy, 2003), ενώ αναφέρονται ακόμη και τριπλάσιες αποδόσεις με την εφαρμογή άρδευσης σε σχέση με ξηρική καλλιέργεια (Larson et al., 2001). Οι απαιτήσεις του αραβόσιτου σε νερό κυμαίνονται από 500-900mm (Howell et al., 1996). Η συχνότητα άρδευσης επηρεάζει την

απόδοση σπόρου του καλαμποκιού σύμφωνα με τους Kara και Biber (2008), ενώ οι Filintas et al. (2008) προτείνουν άρδευση κάθε 9 ημέρες. Ιδιαίτερα στο στάδιο της άνθησης και έπειτα από αυτό είναι απαραίτητο συνεπές πρόγραμμα άρδευσης (Quintana και Diaz, 1971, Kranz et al., 2008; Evans et al., 1996). Ακόμα, ίσως να επιδιώκεται εφαρμογή μεταβλητών δόσεων άρδευσης ανάλογα με τις ανάγκες του φυτού ανά περίοδο σε σχέση με σταθερό πρόγραμμα άρδευσης καθ' όλη την διάρκεια της καλλιέργειας (σε περιπτώσεις επάρκειας υδάτινων πόρων) (Sexton et al., 1996). Ακόμα, οι ανάγκες σε άρδευση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από την φυτοκάλυψη που παρουσιάζεται από την καλλιέργεια καθώς σε μεγάλη πυκνότητα φυτών παρουσιάζεται μεγάλη φυλλική επιφάνεια άρα μεγάλος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής άρα αρκετές ανάγκες για άρδευση στον αραβόσιτο (Shaw, 1988). Έτσι, προτείνεται και ρύθμιση των πληθυσμών των φυτών ανάλογα με τα αποθέματα σε υδάτινους πόρους. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Olson (1971) δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην χρήση νερού είτε εγκατασταθεί πυκνότητα φυτών 3500 ανά στρέμμα, 4500 ανά στρέμμα και 7000 ανά στρέμμα. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την δόση άρδευσης που εφαρμόζεται. Γενικά, για την εφαρμογή των αρδεύσεων θα πρέπει να αποφεύγουμε την τεχνητή βροχή γιατί επιδρά αρνητικά στην επικονίαση που έχει σαν επακόλουθο την πτώση της απόδοσης του αραβόσιτου (Ασημιάδης, 1982).

Ο αραβόσιτος χρησιμοποιεί 32 χιλιογραμμάρια νερού για την παραγωγή ενός χιλιογραμμαρίου ξηρής ουσίας των υπέργειων μερών (Δαλιάνης, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ

3.1. Γενικά

Το σημαντικότερο ίσως κομμάτι στην διαχείριση της άρδευσης είναι να αποφασιστεί ο χρόνος της άρδευσης και η ποσότητα του νερού που πρέπει να εφαρμοστεί. Η έλλειψη κινήτρων, η μειωμένη για διάφορους λόγους αποδοτικότητα πολλών αρδευτικών έργων και οι ελλειπείς γνώσεις για την ορθή διαχείριση των υδάτων, συμπεριλαμβανομένου και του προγραμματισμού σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης, έχουν σαν αποτέλεσμα αφενός τη σπατάλη του νερού και αφετέρου την μειωμένη αρδευτική αποδοτικότητα. Η αρδευόμενη γη είναι συχνά μεγαλύτερη από ότι είχε σχεδιαστεί και εφόσον η αποδοτικότητα της άρδευσης είναι μειωμένη, η παραγωγικότητα είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη ή την επιθυμητή. Σε μια εποχή όπου ο ανταγωνισμός ανάμεσα στους δυνητικούς χρήστες του χρήσιμου για τον άνθρωπο νερού είναι μεγάλος, η υδροβόρα αγροτική παραγωγή καλείται να αναλάβει το μερίδιο ευθύνης που της αναλογεί και να προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα (Τζουρμακλιώτης, 2013).

3.2. Αυτοματισμοί

Η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών φαίνεται ότι μπορεί να προτείνει λύσεις και στο πρόβλημα της μειωμένης αποδοτικότητας της άρδευσης ξεκινώντας από τον σχεδιασμό των αρδευτικών δικτύων και φτάνοντας μέχρι τη διαχείριση σε επίπεδο αγροτικής εκμετάλλευσης. Η χρήση τεχνολογιών όπως η τηλεματική, ο αυτοματισμός, η πληροφορική αλλά και η τηλεπισκόπηση βελτιώνουν την άρδευση καλλιεργειών και οδηγούν σε εξοικονόμηση νερού, καλύτερη παραγωγή και μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος (Μορόπουλος, 2005). Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές ερευνητικές μελέτες σχετικά με την αποτελεσματικότητα εγκατάστασης αυτοματισμών στην άρδευση.

Κατά τον Phene at al. (1989) οι Η/Υ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή αποφάσεων για την άρδευση (χρόνος και ποσότητα νερού), λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δεδομένα που καταγράφουν είναι έγκυρα και έγκαιρα. Επιπλέον μπορούν να ελέγχουν τη απόδοση του αρδευτικού συστήματος, να προσαρμόζουν τις εφαρμογές

της άρδευσης καθώς οι κλιματικές και άλλες παράμετροι μεταβάλλονται κατά τη διάρκειά της, να επεξεργάζονται δεδομένα ανάδρασης ώστε να αξιολογούν την διαδικασία της άρδευσης και να κρατούν αναλυτικό ημερολόγιο για την αρδευτική δραστηριότητα σε κάθε καλλιεργητική περίοδο. Αυτοματοποιημένα δίκτυα μετεωρολογικών σταθμών, συστήματα μέτρησης χαρακτηριστικών του εδάφους και φυτών, καθώς και δυναμικά μοντέλα του συστήματος εδάφους - φυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν επικουρικά.

Οι Dukes et al. (2003) συγκρίνανε τα αποτελέσματα της αυτόματης άρδευσης βάση των ενδείξεων υγρασίας των υψηλής συχνότητας αισθητήρων στο έδαφος, με αυτά χειροκίνητης άρδευσης βάση των ενδείξεων εξατμισόμετρου σε καλλιέργεια πιπεριάς (*Capsicum annuum L.*). Οι δύο μέθοδοι αξιολογήθηκαν βάση της εμπορεύσιμης απόδοσης της πιπεριάς, του όγκου του νερού που χρησιμοποιήθηκε και του επιπέδου υγρασίας στο έδαφος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δύο μεταχειρίσεις που δέχθηκαν μεγαλύτερη εποχιακή ποσότητα νερού και με τις δύο μεθόδους δεν είχαν στατιστικώς σημαντική διαφορά στην παραγωγικότητα. Ωστόσο, οι δύο αυτές μεταχειρίσεις που αρδεύονταν αυτόματα (σε σχέση με αυτές που αρδεύονταν χειροκίνητα) κατανάλωσαν τη μισή σχεδόν ποσότητα νερού, διατηρώντας ταυτόχρονα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας στο έδαφος.

Οι Caceres et al. (2006), ασχολήθηκαν με την αξιολόγηση σε υπαίθριες καλλιέργειες, ενός νέου συστήματος ελέγχου αυτόματης άρδευσης με δίσκο (tray), που χρησιμοποιείται σε θερμοκηπιακές κυρίως καλλιέργειες. Ο κύριος λόγος πραγματοποίησης αυτής της έρευνας ήταν ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση της αυτόματης άρδευσης με βάση τη μέθοδο αυτή (ICT, Irrigation Control Tray) σε σχέση με την δοκιμασμένη μέθοδο αυτόματης άρδευσης με μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τενσιόμετρα (ET), που έχει αποδειχθεί ως επιτυχημένη μέθοδος. Την πρωτοτυπία του όλου εγχειρήματος αποτέλεσε το γεγονός ότι τα φυτά αρδεύονταν κατά τη διάρκεια ολόκληρου του πειράματος (18 μήνες). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βιομάζα των φυτών της μεθόδου ICT συγκρινόμενη με αυτή της μεθόδου ET δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά. Επιπροσθέτως, η αντιστοιχία γεγονότων άρδευσης ήταν συγκρίσιμη. Συνεπώς, το ICT είναι ένα αποδεκτό σύστημα αυτοματοποιημένης άρδευσης ανάπτυξης καλλιεργειών σε εμπορευματοκιβώτια και ίσως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ομογενείς τομείς παραγωγής.

Οι Nemali και van Iersel (2006), ασχολήθηκαν με τη μελέτη ενός αυτόματου συστήματος για έλεγχο της ξηρασίας και της άρδευσης σε φυτά τοποθετημένα σε

δοχεία. Αντίθετα από τα περισσότερα συστήματα αυτοματοποιημένης άρδευσης, το συγκεκριμένο σύστημα είχε ελάχιστη έως καθόλου απώλεια νερού. Το σύστημα απαιτούσε μικρή τροφοδότηση κατά τη διάρκεια της εργασίας. Σε ότι αφορά στην ώρα της ημέρας, το σύστημα πότιζε τα φυτά όταν η υγρασία του υποστρώματος έπεφτε κάτω από το επιθυμητό επίπεδο.

Οι Noble et al. (1999) σύγκριναν την εφαρμογή αυτόματης άρδευσης σε καλλιέργεια μπάμιας που προκαλούνταν από αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους με αυτή που προκαλούνταν από αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας αέρα και φύλλων σε συνάρτηση με την υγρασία του εδάφους. Επίσης αξιολογήθηκαν διάφοροι τύποι αισθητήρων ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν την ποσότητα του νερού που καταναλωνόταν ανά ημέρα, την θερμοκρασία αέρα - φύλλων καθώς και την περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος. Η μελέτη έδειξε ότι και τα δύο συστήματα ήταν αποδοτικά και μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν εφαρμογές χαμηλού κόστους και ελάχιστης επίβλεψης σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Η άρδευση βασισμένη στους αισθητήρες μέτρησης υγρασίας κατανάλωσε περισσότερο νερό, διατήρησε υψηλότερη την υγρασία στο ριζόστρωμα και έδωσε αναλογικά μεγαλύτερη παραγωγή.

Ο Jones (2004), διερεύνησε διάφορες διαθέσιμες μεθόδους για τον προγραμματισμό της άρδευσης. Αντιπαρέβαλλε παραδοσιακές προσεγγίσεις, που βασίζονται στον προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους και στην ανίχνευση της απόκρισης των φυτών σε υδατικά ελλείμματα, με άλλες πιο σύγχρονες. Η πιο χαρακτηριστική και καινοτόμος μέθοδος, ήταν η χρήση υπέρυθρης θερμομετρίας και θερμογραφίας για την μελέτη στις μεταβολές αγωγιμότητας στα στόματα των φύλλων, με ταυτόχρονη χρήση αισθητήρων για τον προσδιορισμό του νερού σε φυτικούς ιστούς. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των μεθόδων που βασίζονται στις μετρήσεις σε φυτικούς ιστούς, με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας (θερμομετρία και θερμογραφία), εξανεμίζονται λόγω των πρακτικών δυσκολιών που παρουσιάζει μέχρι στιγμής η εφαρμογή τους.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, με την ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών, αρκετές έρευνες επικεντρώνονται στην αυτόνομη άρδευση με ασύρματους αισθητήρες σε συστήματα γεωργικής παραγωγής. Τέτοια συστήματα μελετήθηκαν για κάλυψη μεγάλων περιοχών, εξαλείφοντας το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των ενσύρματων δικτύων. Τα ασύρματα δίκτυα με τα διάφορα πρωτόκολλα που εφαρμόζουν (GSM, GPRS, WLAN, WPAN κ.ά.), προσφέρουν τη δυνατότητα

επιπλέον αξιοποίησης των πληροφοριών άλλα και νέες προοπτικές για την αυτοματοποίηση της άρδευσης. Συνδυάζοντας την συστηματική καταγραφή των δεδομένων κάθε τύπου (γεωχωρικά, μετεωρολογικά, κλιματικά κ.ά.) με λογισμικά λήψης αποφάσεων, μπορούν να προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στην αυτοματοποίηση τόσο της άρδευσης όσο και της αγροτικής παραγωγής γενικότερα (Τζουρμακλιώτης, 2013).

Επίσης, σημαντικό πρόβλημα με τις πιο εξειδικευμένες και ολοκληρωμένες προτάσεις για την χρήση αυτοματισμών στην άρδευση, εκτός από το κόστος προμήθειας και διαχείρισης του εξοπλισμού, είναι η πολυπλοκότητα. Ένας απλός αγρότης, ειδικά στη χώρα μας, αδυνατεί τις πιο πολλές φορές να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις διαχείρισης των εξελιγμένων αυτών συστημάτων. Κατέστη έτσι φανερό ότι η συνολικότερη διαχείριση αυτοματισμών στην άρδευση θα ήταν καλύτερο να εφαρμοστεί για ένα σύνολο παραγωγών μιας ευρύτερης περιοχής ή για μια ειδική κατηγορία καλλιεργειών, με τη συνδρομή εξειδικευμένου προσωπικού (Τζουρμακλιώτης, 2013).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας προσπάθειας με εφαρμογή στην άρδευση, είναι η εγκατάσταση δικτύου μετεωρολογικών σταθμών σε μεγάλη περιοχή της Ισπανίας. Ο καθένας από αυτούς λειτουργεί αυτόματα και χρησιμοποιεί αισθητήρες. Το σύστημα αυτό παρέχει υποστηρικτικές και συμβουλευτικές υπηρεσίες άρδευσης (IAS - Irrigation Advisory Services) στους αγρότες της περιφέρειας Castilla La Mancha. Οι υπηρεσίες παρέχονται από έναν Οργανισμό που ιδρύθηκε το 1999 από τη Διεύθυνση Γεωργίας και Περιβάλλοντος της Περιφέρειας και το Περιφερειακό Κέντρο Σπουδών Νερού (Μορόπουλος, 2005). Αυτοί οι αισθητήρες μετρούν τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, καθώς επίσης και την ηλιακή ακτινοβολία - φωτεινότητα. Οι σταθμοί αυτοί συνδέονται με δίκτυο τηλεμετρίας με κεντρική μονάδα αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων, που διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό. Έτσι, οι ωφελούμενοι παραγωγοί μπορούν και απολαμβάνουν συμβουλευτικές υπηρεσίες άρδευσης σχετικά με τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος, την ποιότητα νερού και τους περιβαλλοντικούς κίνδυνους, τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό, τον προγραμματισμό της άρδευσης ανά ομάδα (τύπο) καλλιεργειών και την ανάλυση της επίδοσης του συστήματος της άρδευσης. Το γεγονός αυτό, τους επιτρέπει με τον κατάλληλο εξοπλισμό να αυτοματοποιήσουν την άρδευση και κατ' επέκταση την παραγωγή τους. Τα κύρια οφέλη από τη χρήση αυτού του συστήματος παροχής

υπηρεσιών είναι η εξοικονόμηση στην κατανάλωση νερού η μείωση κόστους παραγωγής, η άμεση παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων για την καλλιέργεια, η αύξηση ποσότητας και η βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής (Μορόπουλος, 2005).

Με την προσπάθεια εφαρμογής στην πραγματική αγροτική παραγωγή, αναδύθηκαν περισσότερα ζητήματα πρακτικής εφαρμογής. Δύο από αυτά είναι η αδυναμία πρόβλεψης των εγγενών διακυμάνσεων διαφόρων παραμέτρων καθώς και το κόστος εφαρμογής σε μικρότερες κλίμακες. Όταν έγινε αντιληπτή η δυσκολία εφαρμογής σε μικρής κλίμακας εκμεταλλεύσεις, άρχισαν να βγαίνουν στο φως ερευνητικές δραστηριότητες για την παροχή των πλεονεκτημάτων της σύγχρονης τεχνολογίας σε ανεκτό κόστος για τον παραγωγό.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη των Vellidis et al (2008), οι οποίοι δοκίμασαν τη χρήση συστοιχίας έξυπνων αισθητήρων συλλογής δεδομένων και την ενσωμάτωσή τους σε ένα σύστημα άρδευσης κλειστού βρόγχου στο βαμβάκι. Σε αυτό το σύστημα οι πληροφορίες των αισθητήρων καθορίζουν το χρόνο και την ποσότητα της άρδευσης σε πραγματικό χρόνο και σε συγκεκριμένη θέση. Η συστοιχία αποτελείται από ένα κεντρικό δέκτη, συνδεδεμένο σε έναν φορητό υπολογιστή και πολλαπλούς κόμβους αισθητήρων που εγκαθίστανται στην καλλιέργεια. Στους κόμβους αισθητήρων συναθροίζονται, μέχρι τρεις αισθητήρες υγρασίας εδάφους και μέχρι τέσσερα θερμοζεύγη, ένα ειδικά σχεδιασμένο κύκλωμα και ένα σύστημα μετάδοσης ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν ενθαρρυντικά και έδειξαν ότι ένα τέτοιο σύστημα με 20 κόμβους και κόστος περίπου 2400 δολαρίων μπορεί να αρδεύσει αυτόματα, σε πραγματικό χρόνο και σε συγκεκριμένες θέσεις στην καλλιέργεια, όπου παρουσιάζεται υδατικό έλλειμμα.

Παρομοίως, στη μελέτη των Dursun και Ozden (2011) ένα ασύρματο δίκτυο συλλογής δεδομένων εγκαταστάθηκε σε αγρόκτημα με 1000 δένδρα νάνων κερασιών με σκοπό την εφαρμογή αυτοματοποιημένης διαδικασίας στάγδην άρδευσης βάση των μετρήσεων των αισθητήρων. Οι αισθητήρες σε απόσταση 50cm από το δένδρο και σε βάθος 20cm, μετρούσαν σε πραγματικό χρόνο τις μεταβολές στη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους για να προσδιοριστεί η διακύμανση της περιεχόμενης υγρασίας. Τα στοιχεία στέλνονταν μέσω ασύρματου σταθμού που κατά θέση τροφοδοτούνταν με ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο μάλιστα τροφοδοτούσε με ρεύμα και την παρακείμενη βαλβίδα άρδευσης. Κατά τους

συγγραφείς, το σύστημα αυτό μπορεί να προταθεί για χρήση σε διάφορες εμπορικές καλλιέργειες, δεδομένου ότι είχε χαμηλό κόστος και αξιόπιστη λειτουργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1. Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται ο σχεδιασμός του πειράματος, οι παράμετροι και οι μεταβλητές που απαιτείται να μετρηθούν για την αξιολόγηση της άρδευσης. Επιπλέον, περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες, από τις οποίες προέκυψαν οι μετρήσεις των παραμέτρων και των μεταβλητών αυτών, όπως επίσης και τα συστήματα και οι τεχνικές άρδευσης των πειραματικών τεμαχίων.

4.2. Εγκατάσταση και διεξαγωγή του πειράματος

Το πειραματικό μέρος της παρούσας έρευνας διεξήχθη στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2017.

Σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε σύστημα επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας και της δόσης άρδευσης.

4.3. Σχεδιασμός πειράματος

Η χάραξη του πειραματικού αγρού πραγματοποιήθηκε μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας της σποροκλίνης. Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων και περιελάμβανε 3 μεταχειρίσεις σε 3 επαναλήψεις. Όλες οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν αυτοματοποιημένες, εκτός της μεθόδου προγραμματισμού της άρδευσης με τη χρήση του απλού εξατμισιμέτρου τύπου A. Η δόση άρδευσης σε όλες τις μεταχειρίσεις ήταν ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό. Το εμβαδόν κάθε πειραματικού τεμαχίου ήταν περίπου 30m² και περιελάμβανε 4 σειρές φυτών. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο με διάμετρο 20 mm και απείχαν μεταξύ τους 1,60 m. Οι σταλακτήρες ήταν αυτοκαθαριζόμενοι και αυτορυθμιζόμενοι, με ισαποχή 80 cm μεταξύ τους και παροχή 2,3 lt/h έκαστος. Οι μετρήσεις των διαφόρων χαρακτηριστικών του φυτού όπως ύψος φυτού και ξηρή βιομάζα, πραγματοποιούνταν σε φυτά που βρίσκονταν στις δύο

μεσαίες γραμμές σποράς. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύχθηκε η αλληλεπίδραση με τα γειτονικά πειραματικά τεμάχια.

Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής:

- εφαρμογή δόσης άρδευσης μετρώντας την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με εξατμισόμετρο τύπου A (PAN100),
- εφαρμογή δόσης άρδευσης μετρώντας την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με την μέθοδο Penman – Monteith κατά FAO (PM100) και
- εφαρμογή δόσης άρδευσης μετρώντας την εδαφική υγρασία με αισθητήρες Watermark (WM100).



Εικόνα 4.1. Απεικόνιση των αγωγών εφαρμογής στον πειραματικό αγρό.

4.4. Περιγραφή Μεθόδων

4.4.1. Απλό εξατμισόμετρο τύπου A

Επιφανειακή στάγδην άρδευση με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας, όπως αυτές καθορίζονται από την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή ET.

Πλεονεκτήματα μεθόδου:

- Εύκολη στο χειρισμό.
- Προσιτή στους παραγωγούς.

- Απαιτεί τους λιγότερους υπολογισμούς.
- Κόστος σε λογικά πλαίσια.

Μέθοδος εξατμισιμέτρου κατά FAO - 24:

$$ETr = k_p * E_p$$

όπου:

ETr: εξατμισοδιαπνοή αναφοράς χορτοτάπητα ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

E_p: ένδειξη εξάτμισης από εξατμισόμετρο τύπου λεκάνης ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), και

k_p: συντελεστής εξατμισιμέτρου που δίνεται σε πίνακα σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της μέσης σχετικής υγρασίας και του είδους και της έκτασης της επιφάνειας που περιβάλλει το εξατμισόμετρο.

Εάν η εγκατάσταση και η συντήρηση του εξατμισιμέτρου πραγματοποιείται ορθώς, εάν το περιβάλλον που τοποθετείται είναι σταθερό και εφόσον η περιοχή δεν είναι εκτεθειμένη σε ισχυρούς ανέμους, η μέθοδος μπορεί να αποδειχθεί το ίδιο αξιόπιστη για τον υπολογισμό της ETr όσο και οι υπόλοιπες.



Εικόνα 4.2. Απλό εξατμισόμετρο τύπου Α εγκατεστημένο στον πειραματικό αγρό.

4.4.2. Penman – Monteith κατά FAO

Αυτόματη, επιφανειακή, στάγδην άρδευση, με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας.

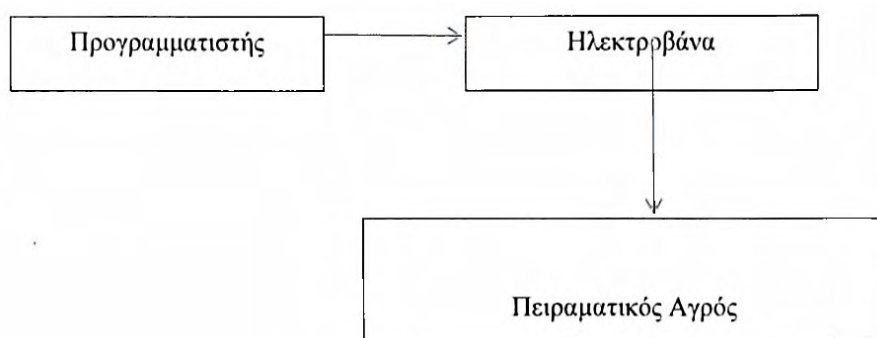
Ο προγραμματισμός άρδευσης έγινε βάσει της συνδυασμένης μεθόδου Penman - Monteith κατά FAO.

Είναι μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς βασιζόμενη σε κλιματικές παραμέτρους.

Χαρακτηριστικά:

- Μεγάλης ακρίβειας.
- Υψηλό κόστος.

Είναι η απλούστερη μορφή αυτοματισμού.



Σχήμα 4.1. Τρόπος λειτουργίας P - M.

4.4.3. Watermark

Αυτόματη, επιφανειακή, στάγδην άρδευση, με εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού ίση με το 100% των αναγκών της καλλιέργειας, όπως αυτές καθορίζονται από τη διακύμανση της υγρασίας εδάφους. Για την υλοποίηση της άρδευσης στη συγκεκριμένη μεταχείριση, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας μέτρησης υδατικού δυναμικού του εδάφους (Watermark) (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3. Αισθητήρας Watermark.

Οι αισθητήρες Watermark είναι αισθητήρες πορώδους κάψας (G.M.S.) με εσωτερικά καλώδια, που μετρούν την ηλεκτρική αντίσταση του υλικού αναφοράς (Irometer,

2010). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην πολύ εύκολη ανταλλαγή υγρασίας μεταξύ της πορώδους κάψας τους και του εδάφους. Απορροφούν υγρασία από το υγρό (πρόσφατα αρδευμένο) έδαφος ή χάνουν υγρασία, καθώς χάνεται υγρασία από το έδαφος. Σε κάθε περίπτωση, η υγρασία της κάψας μεταβάλλει την ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των καλωδίων που είναι ενσωματωμένα σε αυτή. Η μεταβολή αυτή αποδίδεται σε καταγραφικό (Data logger) και με χρήση κατάλληλου λογισμικού μεταφράζεται σε cbars υδατικού δυναμικού. Οι εν λόγω αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα μέτρησης υδατικού δυναμικού σε ένα ευρύ φάσμα πιέσεων, δηλαδή από -10 kPa έως -200 kPa (Καρατάσιου κ.ά., 2017). Όσο υψηλότερη είναι η τάση του εδαφικού νερού, τόσο λιγότερο νερό βρίσκεται στο πορώδες μέσο και συνεπώς, τόσο υψηλότερη είναι και η ηλεκτρική αντίσταση (Καρατάσιου, 2019).

Στον πειραματικό αγρό τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες Watermark, οι οποίοι συνδέθηκαν με κατάλληλο καταγραφικό (Data Logger) που συνοδεύονταν από λογισμικό μετατροπής των mvolts από τους αισθητήρες σε cbars πίεσης νερού στο έδαφος. Οι τιμές καταγράφονταν ανά 60 λεπτά της ώρας. Με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους, που προέκυψε από τις εργαστηριακές μετρήσεις των εδαφικών δειγμάτων του πειραματικού αγρού, πραγματοποιήθηκε αναγωγή των τιμών υδατικού δυναμικού του εδάφους (cbars) σε % κατ' όγκο υγρασία, ώστε έπειτα να καθοριστούν τα πραγματικά όρια έναρξης και λήξης της άρδευσης (Καρατάσιου κ.ά., 2019).

4.5. Καλλιεργητικές Φροντίδες

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε καλή κατεργασία του εδάφους, έτσι ώστε να είναι ψιλοχωματισμένο και με ομοιόμορφη κλίση. Μάλιστα, η καλή κατεργασία του εδάφους αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή σπορά. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαιτούμενες καλλιεργητικές εργασίες, σύμφωνα με τη γενικότερη καλλιεργητική πρακτική της περιοχής.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η σπορά της καλλιέργειας του αραβόσιτου στις 10/04/2017. Για τη σπορά χρησιμοποιήθηκε πνευματική σπαρτική μηχανή τεσσάρων μονάδων. Οι αποστάσεις σποράς ήταν 15,5cm επί της γραμμής και 75cm μεταξύ των γραμμών σποράς.

Την επόμενη ημέρα (11/04/17) πραγματοποιήθηκε χημική ζιζανιοκτονία προφυτρωτικά, με εφαρμογή της ζιζανιοκτόνου ουσίας Pendimethalin και δόση 350 - 400gr/στρ. Στις 12/04/17 πραγματοποιήθηκε άρδευση με καταιονισμό για να

βοηθηθεί το φύτεμα της καλλιέργειας και για την επιτυχή ενεργοποίηση του συγκεκριμένου ζιζανιοκτόνου. Ενώ στις 14/04/17 πραγματοποιήθηκε έλεγχος φυτρώματος της καλλιέργειας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε και ένα σκάλισμα με το χέρι, στις 26/05/17.

Στο πλαίσιο της νέας αειφορικής γεωργίας των χαμηλών εισροών δεν πραγματοποιήθηκε κανενός είδους λιπαντική αγωγή ή άλλου είδους προσθήκη θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος των πειραματικών τεμαχίων.

4.6. Μετρήσεις χαρακτηριστικών της καλλιέργειας

4.6.1. Μέτρηση του ύψους των φυτών

Με σκοπό να παρατηρηθεί ο ρυθμός αύξησης του αραβοσίτου, διενεργήθηκαν μετρήσεις ύψους φυτών σε κάθε πειραματικό τεμάχιο. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν με τη βοήθεια άκαμπτου μεταλλικού γνώμονα μήκους 2,5m, από την επιφάνεια του εδάφους έως το σημείο έκπτυξης του φύλλου σημαίας (flag leaf), του κάθε φυτού. Οι μετρήσεις αυτές ήταν εβδομαδιαίες και πραγματοποιούνταν σε φυτά που παρουσίαζαν ομοιόμορφη ανάπτυξη και σε αριθμό φυτών που αντιστοιχούσε σε επιφάνεια εδάφους 1m². Στη συνέχεια υπολογιζόταν ο μέσος όρος του ύψους των φυτών σε κάθε πειραματικό τεμάχιο. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 17 μετρήσεις οι οποίες ξεκίνησαν προς το τέλος του τρίτου δεκαημέρου του Απριλίου (28/4/2017).

4.6.2. Μέτρηση της βιομάζας των φυτών

Οι μετρήσεις της ξηρής βιομάζας πραγματοποιήθηκαν την ημέρα που έγινε και η συγκομιδή του καρπού της καλλιέργειας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μεμονωμένα φυτά με τη μέθοδο της καταστροφικής δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα φυτά στα οποία πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις του ύψους.

Κατά τη δειγματοληψία, τα φυτά αποκόπτονταν με ειδικό κοπτικό εργαλείο στο στέλεχος τους, στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους έτσι ώστε να λαμβάνεται μόνο το υπέργειο μέρος των φυτών. Στη συνέχεια, τα δείγματα τοποθετούνταν σε χάρτινες σακούλες και ξηραίνονταν σε ειδικό πυριαντήριο (Εικόνα 4.4) στους 40°C, μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους (Samuelson et al., 2006). Μετά την διαδικασία της ξήρανσης τα δείγματα ζυγίζόταν ξανά σε ζυγό ακριβείας (Εικόνα 4.5) έτσι ώστε να προσδιοριστεί το ξηρό τους βάρος και στη συνέχεια να αναχθεί σε ξηρή βιομάζα (υπέργεια) στο στρέμμα ανά μεταχείριση.



Εικόνα 4.4 και 4.5. Το πυριαντήριο και ο ζυγός ακριβείας.

4.6.3. Απόδοση σε καρπό

Για τον υπολογισμό της απόδοσης σε καρπό της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε συγκομιδή των σπαδικών με το χέρι των φυτών των οποίων πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις του ύψους. Οι σπάδικες τοποθετήθηκαν σε χάρτινες σακούλες και ακολουθήθηκε ξήρανση στους 60°C ώστε η υγρασία του σπόρου να κατέλθει περίπου στο 14%. Έπειτα, έγινε διαχωρισμός των σπόρων από τον σπάδικα με τη βοήθεια θεριζοαλωνιστικής μηχανής εκπαιδευτικού τύπου. Τέλος, έγινε ζύγιση του καρπού στον ζυγό ακριβείας και αναγωγή της απόδοσης του καρπού στο στρέμμα ανά μεταχείριση. Η συγκομιδή έλαβε μέρος στις 12 Σεπτεμβρίου του 2017.

4.7. Ποσότητα του νερού άρδευσης

Η ποσότητα του νερού άρδευσης που εφαρμοζόταν σε κάθε πειραματικό τεμάχιο, σε κάθε μεταχείριση, αλλά και συνολικά, ελεγχόταν μέσω υδρομετρητών (Εικόνα 4.6). Οι υδρομετρητές ήταν εγκαταστημένοι στο σημείο υδροληψίας του κάθε πειραματικού τεμαχίου δηλαδή στο σημείο όπου συνδεόταν ο αγωγός τροφοδοσίας με τους αγωγούς εφαρμογής όπως έχει προαναφερθεί. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 9 υδρομετρητές νερού. Η καταγραφή των ποσοτήτων νερού που εφαρμόζονταν, γίνονταν πριν και μετά το τέλος κάθε άρδευσης. Επιπλέον, πραγματοποιούνταν

σύγκριση της συνολικής ποσότητας νερού που κατέγραφαν οι υδρομετρητές, με την ποσότητα που κατέγραφαν οι κεντρικοί υδρομετρητές στις κεφαλές ελέγχου.

Με τακτικό έλεγχο των υδρομετρητών εξασφαλιζόταν η έγκαιρη διαπίστωση και αποκατάσταση τυχόν δυσλειτουργιών ή αστοχίας του συστήματος. Έτσι, κατέστη δυνατόν ο έλεγχος της ομοιομορφίας εφαρμογής του νερού άρδευσης και των τυχόν αποκλίσεων από την επιθυμητή δόση άρδευσης.



Εικόνα 4.6. Υδρόμετρο τοποθετημένο στον πειραματικό αγρό.

4.8. Κλιματικά δεδομένα

Κατά την διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων, τα μετεωρολογικά δεδομένα συλλέγονταν και καταγράφονταν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής (Εικόνα 4.7).

Ο μετεωρολογικός σταθμός ήταν εγκατεστημένος στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, σε απόσταση περίπου 50m από το μέσο του πειραματικού αγρού. Τα μετεωρολογικά δεδομένα συλλέγονταν και καταγράφονταν ανά 12min. Ειδικότερα, καταγράφονταν η θερμοκρασία αέρος ($^{\circ}\text{C}$), η σχετική υγρασία αέρος (%), η βροχόπτωση (mm), η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους (m/s) και τέλος η ηλιακή ακτινοβολία (W/m).



Εικόνα 4.7. Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής.

Ο μετεωρολογικός σταθμός ήταν ο MetosCompact, της εταιρείας Pessl Instruments GmbH, που εδρεύει στην Αυστρία. Ο μετεωρολογικός σταθμός αποτελείται από το κεντρικό τμήμα, στο οποίο βρίσκεται το καταγραφικό σύστημα και η κεντρική πλακέτα ελέγχου, από τους αισθητήρες, από το φωτοβολταϊκό σύστημα και από το σύστημα τηλεμετρίας.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο παράγει την απαιτούμενη ενέργεια για να λειτουργήσει ο μετεωρολογικός σταθμός και από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο παράγει την απαιτούμενη ενέργεια για να λειτουργήσει το σύστημα τηλεμετρίας.

Το σύστημα τηλεμετρίας αποτελείται από ένα διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή ή modem (modulator-demodulator), το οποίο λειτουργεί ως εξυπηρετητής GSM. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα οποιουδήποτε ηλεκτρονικός υπολογιστής που είναι εξοπλισμένος με modem (ψηφιακό ή αναλογικό) και έχει πρόσβαση σε γραμμή τηλεφωνίας (επίγεια ή κυψελωτή) να συνδεθεί στο σταθμό και να εκτελέσει διάφορες εργασίες, όπως να λάβει (download) τα δεδομένα και να ελέγξει την κατάσταση λειτουργίας του σταθμού.

Προϋπόθεση για τη διασύνδεση του μετεωρολογικού σταθμού με οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω τηλεμετρίας, είναι η ύπαρξη του κατάλληλου

λογισμικού. Το λογισμικό αυτό ονομάζεται MetLink και το παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία του σταθμού. Το MetLink έχει τη δυνατότητα να συνδέεται μέσω τηλεμετρίας στον μετεωρολογικό σταθμό, να λαμβάνει τα δεδομένα και να τα αποθηκεύει στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη, σε αρχείο τύπου βάσης δεδομένων. Έτσι, κάθε φορά που το MetLink συνδέεται με τον μετεωρολογικό σταθμό δεν χρειάζεται να αντλεί όλα τα δεδομένα από την αρχή, αλλά μόνο όσα λείπουν από τη βάση δεδομένων, δηλαδή τα μεταγενέστερα του σημείου όπου είχε σταματήσει η προηγούμενη λήψη.

Το λογισμικό MetLink, εκτός από τις παραπάνω λειτουργίες, παρέχει και τη δυνατότητα αυτόματου υπολογισμού της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει της τροποποιημένης συνδυαστικής μεθόδου των Penman-Monteith, όπως αυτή περιγράφεται στο Irrigation and drainage paper 56 του Food and Agricultural Organization (Allen et al., 1998).

4.9. Υπολογισμός δόσης άρδευσης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της δόσης και της διάρκειας άρδευσης με τη μέθοδο του απλού εξατμισιμέτρου τύπου A ήταν η παρακάτω. Αρχικά υπολογιζόταν η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET₀). Στη συνέχεια, καθοριζόταν τα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας και υπολογιζόταν ο φυτικός συντελεστής (K_c) και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET_c).

Η ET_c εκφράζει τις απώλειες μιας καλλιέργειας σε νερό. Επομένως, η αρδευτική δόση θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όση και η κατανάλωση από την καλλιέργεια. Ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε η συνολική ποσότητα νερού που θα εφαρμοστεί στον αγρό να καλύπτει τις διάφορες απώλειες. Στον όρο «απώλειες» περιλαμβάνονται οι πραγματικές απώλειες του συστήματος άρδευσης, μια ποσότητα νερού η οποία προορίζεται για έκπλυση αλάτων και μια επιπλέον ποσότητα νερού από πιθανά σφάλματα μέτρησης της εξατμίσης από το εξατμισόμετρο τύπου A λόγω της σκίασης που προκαλούσε το προστατευτικό δίχτυ που σκέπαζε τη λεκάνη του εξατμισιμέτρου. Έτσι, η δόση άρδευσης για τις μεταχειρίσεις που αρδεύτηκαν πλήρως υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$Dn = \frac{K_{ran} \times E_{ran} \times K_c - P_e}{EFF}$$

όπου:

Dn: είναι η δόση άρδευσης (mm),

Kran: είναι ο συντελεστής εξατμισιμέτρου (αδιάστατος),

Eran: είναι η ημερήσια εξάτμιση από το εξατμισόμετρο τύπου A (mm),

Kc: είναι ο φυτικός συντελεστής της καλλιέργειας (αδιάστατος)

Pe: είναι η ωφέλιμη βροχόπτωση (mm) και

EFF: είναι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος στάγδην άρδευσης.

4.10. Υπολογισμός ωφέλιμης ή ενεργού βροχόπτωσης (Pe)

Ωφέλιμη ή ενεργός βροχόπτωση (Pe) είναι το ποσοστό της συνολικής βροχόπτωσης, σε μια καλλιέργεια και σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, το οποίο είναι διαθέσιμο για να καλύψει τις ανάγκες της διαπνοής της καλλιεργημένης έκτασης (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1997).

Όταν η βροχόπτωση είναι μικρότερη από το 20% της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, θεωρείται αμελητέα, διότι εξατμίζεται πλήρως. Το ποσοστό της βροχόπτωσης που χάνεται μέσω της επιφανειακής απορροής εξαρτάται από την σφοδρότητα της βροχής, την κλίση του αγρού και τον τύπο, τις υδραυλικές παραμέτρους και το ποσοστό της υγρασίας του εδάφους (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1997).

Γενικά, η επιφανειακή απορροή θεωρείται αμελητέα για υπολογισμούς ημέρας, διότι το πλεονάζον νερό θεωρείται ότι αναπληρώνει το έδαφος μέχρι το σημείο της υδατοϊκανότητάς του (Allen et al., 1998). Τέλος, σε βροχοπτώσεις με μεγάλο όγκο νερού σε μικρές περιόδους θεωρείται ότι το επιπλέον νερό χάνεται ως βαθιά διήθηση. Στην παρούσα έρευνα δεν υπήρχαν απώλειες του νερού λόγω βαθιάς διήθησης, ούτε ανύψωση υπογείου νερού. Η βροχόπτωση που ήταν μεγαλύτερη από το 20% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, πολλαπλασιάστηκε με έναν συντελεστή ωφελιμότητας ίσο με 0,8 ώστε να καλυφθούν απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους.

4.11. Υπολογισμός αποδοτικότητας εφαρμογής της άρδευσης με σταγόνες (EFF)

Κάθε μέθοδος άρδευσης έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει όσο δυνατόν πιο ομοιόμορφα το νερό σε όλα τα φυτά. Παρόλα αυτά όμως, κάθε μέθοδος παρέχει περισσότερο νερό σε ορισμένα φυτά και λιγότερο σε κάποια άλλα. Λόγω της διαφορετικότητας των μεθόδων άρδευσης, η αποδοτικότητα εκφράζεται σε κάθε μέθοδο με διαφορετικό τρόπο.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της επιφανειακής στάγδην άρδευσης, της οποίας η αποδοτικότητα υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$EFF = TR \cdot EU$$

όπου EFF είναι η αποδοτικότητα εφαρμογής της άρδευσης με σταγόνες ή βαθμός εφαρμογής του νερού, TR είναι το μέρος του νερού που διηθήθηκε στο έδαφος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα από την καλλιέργεια και EU είναι η ομοιομορφία ενστάλαξης.

Οι τιμές του TR κυμαίνονται από 0,9 σε ξηρά κλίματα με μικρό ποσοστό ύγρανσης και αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο νερό, έως 1 σε υγρά κλίματα χωρίς προβλήματα αλάτων. Γενικά, σε ένα σύστημα που λειτουργεί σωστά σε Ελληνικές συνθήκες, η τιμή του TR είναι περίπου 0,95 (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1997).

Η ομοιομορφία ενστάλαξης (EU) σχετίζεται με την καλή λειτουργία των σταλακτών και την σταθερότητα της παροχής τους. Σε δίκτυο άρδευσης που λειτουργεί ικανοποιητικά, η ομοιομορφία ενστάλαξης μπορεί να φτάσει από 0,9 έως 0,95. Αν οι σταλάκτες είναι αυτορρυθμιζόμενοι, τότε η ομοιομορφία ενστάλαξης είναι ίση με 1 (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου, 1997).

Στην παρούσα έρευνα η αποδοτικότητα εφαρμογής της άρδευσης υπολογίστηκε ίση με 0,95 (TR=0,95 και EU=1).

4.12. Υπολογισμός διάρκειας άρδευσης

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

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

Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η γνώση των αποστάσεων σποράς ή φύτευσης, καθώς και η πυκνότητα φύτευσης, δηλαδή ο αριθμός των φυτών επί της γραμμής σποράς. Επομένως, όταν είναι γνωστές οι παραπάνω παράμετροι, η διάρκεια άρδευσης και το ωριαίο ύψος βροχής υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$t = \frac{Dn}{Dh} \quad \text{και} \quad Dh = \frac{q \times n}{St \times Sr}$$

όπου:

t: η διάρκεια άρδευσης (h),

Dn: η δόση άρδευσης (mm)

Dh: το ωριαίο ύψος βροχής (mm/h),

q: η παροχή του σταλάκτη (L/h),

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

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

n: ο αριθμός σταλακτιών ανά δύο γραμμές φυτών και ο οποίος δίνεται από τη σχέση

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

όπου Se: η ισαποχή των σταλακτιών επί του σταλακτηφόρου σωλήνα (αδιάστατος).

4.13. Υπολογισμός εύρους άρδευσης

Το εύρος άρδευσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα καθορίστηκε στις 4 ημέρες. Για την ελαχιστοποίηση πιθανού σφάλματος όπως να μεσολαβεί μεγάλος αριθμός ημερών μεταξύ των αρδεύσεων, πραγματοποιήθηκε έλεγχος του εύρους άρδευσης με τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου. Το άθροισμα των τιμών της πραγματικής ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών αρδεύσεων δεν θα έπρεπε να υπερβαίνει την πρακτική δόση άρδευσης. Για τον υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης απαιτούνταν να είναι γνωστές οι ακόλουθοι παράμετροι:

- η υδατοϊκανότητα του εδάφους (FC),
- το σημείο μόνιμης μάρανσης (PWP),
- το βάθος ριζοστρώματος για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου (RD),
- το όριο εξάντλησης της εδαφικής υγρασίας (C),
- το ποσοστό διαβροχής του εδάφους (P),
- τα χαρακτηριστικά του συστήματος άρδευσης (παροχή q, αριθμός σταλακτιών ανά φυτό n, βαθμός απόδοσης του συστήματος EFF και ισαποχή σταλακτιών επί του αγωγού εφαρμογής Se),
- οι αποστάσεις σποράς ή φύτευσης (Sr),
- οι αποστάσεις των φυτών επί της γραμμής σποράς ή φύτευσης (St) και
- η μέγιστη ημερήσια εξατμισοδιαπνοή για κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου (ETmax).

4.14. Αποδοτικότητα χρήσης νερού

Το πόσο αποδοτική είναι μια άρδευση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως από την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε από την καλλιέργεια, την ποσότητα του αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια και την ομοιομορφία της άρδευσης. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το κόστος της άρδευσης, το σχεδιασμό της και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Η αποδοτικότητα της χρήσης του νερού ή αλλιώς WUE (water use efficiency) αποτελεί την πιο διαδεδομένη παράμετρο βάσει της οποίας μπορεί να αποδοθεί η αποτελεσματικότητα της άρδευσης συναρτήσει της παραγωγής της καλλιέργειας.

Ο Viets (1962) όρισε την αποδοτικότητα χρήσης νερού σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$WUE = \frac{Y_g}{ET}$$

όπου WUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (kg/m^3), Y_g είναι η οικονομική παραγωγή (g/m^2) και ET είναι το συνολικό νερό που χρησιμοποιήθηκε από την καλλιέργεια (mm).

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού εκφράζεται κυρίως από την οικονομική παραγωγή αλλά έχει επικρατήσει να εκφράζεται ως η παραγωγή σε ξηρή βιομάζα (Bos, 1979; Howell, 2001). Ο Monteith (1993) όρισε την WUE ως:

$$WUE = \frac{Y_g}{W_{total}}$$

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

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

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

όπου WUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού (kg/m^3), Y_{gi} είναι η οικονομική παραγωγή (g/m^2) για επίπεδο άρδευσης i , Y_{gd} είναι η παραγωγή (g/m^2) για επίπεδο μηδενικής άρδευσης, ET_i είναι η εξατμισοδιαπνοή (mm) για επίπεδο άρδευσης i και ET_d είναι η εξατμισοδιαπνοή (mm) για επίπεδο μηδενικής άρδευσης. Συχνά σε ξηρές

και ημίξηρες περιοχές, η τιμή του Y_{gd} είναι ίση με 0. Σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται η WUE της άρδευσης (IWUE). Η IWUE ορίζεται ως:

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

όπου IWUE είναι η αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης (kg/m^3) και IRR_i είναι η ποσότητα νερού άρδευσης που εφαρμόστηκε (mm) για επίπεδο άρδευσης i . Στην παραπάνω εξίσωση η τιμή της Y_{gd} είναι 0 για άνυδρες περιοχές.

4.15. Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων

Για την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο SPSS version 23 για χρήση σε περιβάλλον Windows ενώ για τη συλλογή, την ομαδοποίηση και την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα υπολογιστικά φύλλα Excel του Microsoft Office version 2013.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

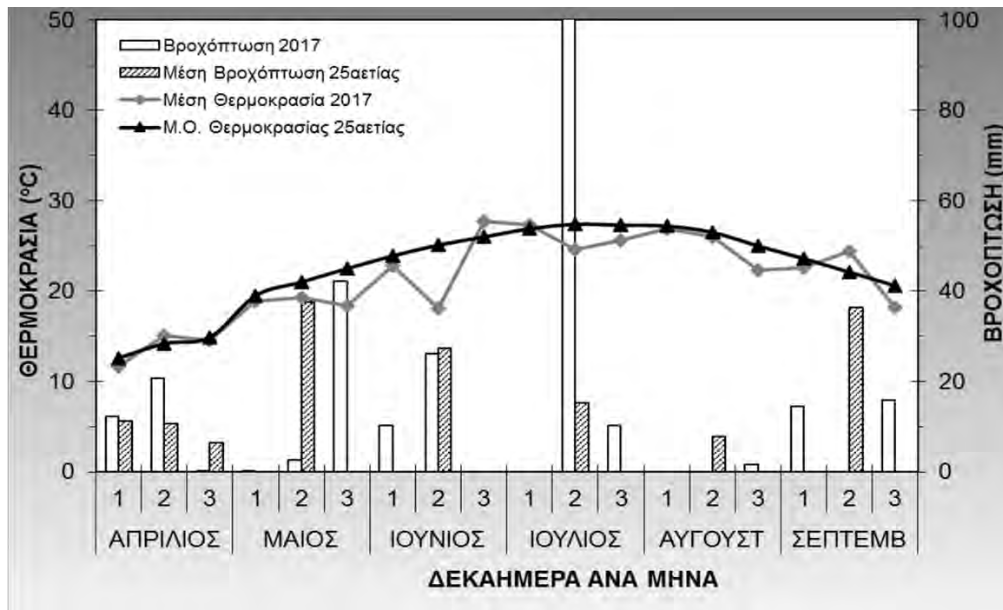
5.1. Γενικά

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας και αφορούν την εξαμυσοδιαπνοή της καλλιέργειας, τις ποσότητες νερού που δέχτηκε η καλλιέργεια, το ύψος των φυτών, την παραγωγή των φυτών σε ξηρή βιομάζα, την εξοικονόμηση νερού καθώς και την αποδοτικότητα χρήσης νερού της καλλιέργειας βάσει της παραγωγής σε ξηρή βιομάζα.

5.2. Κλιματολογικά δεδομένα

Παρακάτω, παρουσιάζεται το ομβροθερμικό διάγραμμα κατά Bagnouls-Gausсен (Bagnouls και Gausсен, 1953), της καλλιεργητικής περιόδου του έτους 2017 (Απρίλιος-Σεπτέμβριος), βάσει των κλιματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Απεικονίζεται επίσης, ως μέτρο σύγκρισης, ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης ανά δεκαήμερο για τα τελευταία 25 έτη.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η καλλιεργητική περίοδος του έτους 2017 χαρακτηρίζεται από περίπου ίσες μέσες θερμοκρασίες αέρος με μερικές αποκλίσεις και υψηλότερη βροχόπτωση σε σχέση με τις μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρος και βροχόπτωσης των τελευταίων 25 ετών.



Διάγραμμα 5.1. Ομβροθερμικό διάγραμμα της καλλιεργητικής περιόδου του έτους 2017.

Οι τιμές της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των μηνών Απριλίου, Μαΐου, Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου της καλλιεργητικής περιόδου του 2017 ήταν στα 33,2mm, 45mm, 36,4mm 118,2mm, 1,6mm και 30,2mm αντίστοιχα. Η συνολική βροχόπτωση που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2017, ήταν ίση με 264,6mm δηλαδή 112mm περισσότερα από τη μέση συνολική βροχόπτωση των τελευταίων 25 ετών, η οποία ήταν ίση με 152,6mm. Τον Ιούλιο η συνολική βροχόπτωση που καταγράφηκε ήταν κατά 87,05% περισσότερη από τη συνολική βροχόπτωση των τελευταίων 25 ετών για τον μήνα αυτό.

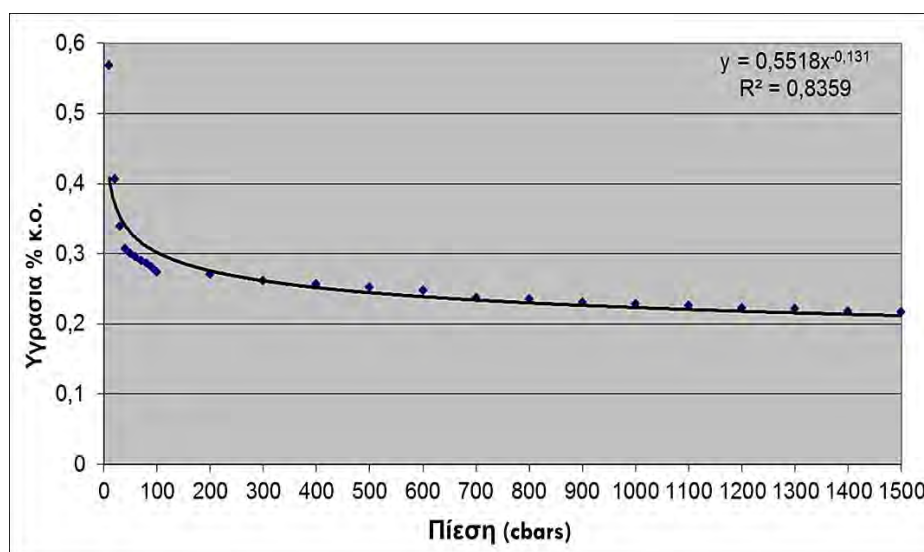
Τέλος, η μέση τιμή της θερμοκρασίας που για την καλλιεργητική περίοδο του 2017 ήταν 21,37°C, δεν διέφερε κατά πολύ από τη μέση τιμή της θερμοκρασίας των τελευταίων 25 ετών, η οποία ήταν ίση με 22,57°C.

Από την στατιστική ανάλυση δεν προκύπτουν στατιστικώς σημαντικά διαφορές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% μεταξύ των τιμών της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας της καλλιεργητικής περιόδου του 2017 με αυτές των τελευταίων 25 ετών.

5.3. Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους

Στο Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη των δειγμάτων εδάφους, όπως αυτή προσδιορίστηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική καμπύλη περιγράφει τις μέσες τιμές πίεσης και

υγρασίας για τα βάθη δειγματοληψίας. Με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους η τιμή 20 cbar αντιστοιχούσε στην υδατοϊκανότητα (περίπου 39,7% κατ' όγκον) και συνεπώς διακόπτονταν η άρδευση. Η τιμή 35 cbar αντιστοιχούσε στο όριο εξάντλησης της υγρασίας στο οποίο η υγρασία εδάφους ήταν 32,1% κατ' όγκο με τη μέση τιμή υγρασίας εδάφους στο σημείο μόνιμης μάρανσης να κυμαίνεται στο 21,7% κατ' όγκο. Ο υπολογισμός της υγρασίας εδάφους που αντιστοιχούσε στο όριο εξάντλησης υπολογίστηκε σύμφωνα με την προσέγγιση των Papanikolaou και Sakelariou, 2012.



Διάγραμμα 5.2. Χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους.

5.4. Εύρος άρδευσης

Από τις εργαστηριακές μετρήσεις προέκυψε ο Πίνακας 5.1, στον οποίο παρουσιάζονται οι τιμές της Υδατοϊκανότητας (FC) και του Σημείου Μόνιμης Μάρανσης (PWP). Για τον υπολογισμό της θεωρητικής και πρακτικής δόσης άρδευσης καθώς και του εύρους άρδευσης (Πίνακας 5.2) χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ETd του Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Τιμές δεδομένων για υπολογισμό της πρακτικής δόσης άρδευσης.

	FC (%κ.ο.)	PWP (%κ.ο.)	RD (m)	C	P	ET _d (mm)
ΜΑΙΟΣ	39,70	21,70	0,40	0,50	1	3,98
ΙΟΥΝΙΟΣ	39,70	21,70	0,50	0,50	1	5,59
ΙΟΥΛΙΟΣ	39,70	21,70	0,60	0,50	1	6,16
ΑΥΓ/ΣΤΟΣ	39,70	21,70	0,60	0,50	1	5,28

Πίνακας 5.2. Υπολογισμός της δόσης, του εύρους και της διάρκειας άρδευσης.

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ/ΣΤΟΣ
Διαθέσιμη υγρασία (ASM): $ASM = \frac{FC - PWP}{100} \times RD$ (mm ή m ³ /στρ.)	72,00	90,00	108,00	108,00
Θεωρητική δόση άρδευσης (Dn): $Dn = ASM \times c \times P$ (mm ή m ³ /στρ.)	36,00	45,00	54,00	54,00
Πρακτική δόση άρδευσης (Dt): $Dt = \frac{Dn}{Ed}$ (mm ή m ³ /στρ.)	40,00	50,00	60,00	60,00
Ωριαίο ύψος βροχής (Dh): $Dh = \frac{q \times n}{St \times Sr}$, mm/h Όπου $n = \frac{St}{2 \times Se} \approx 0,08$	2,00	2,00	2,00	2,00
Διάρκεια άρδευσης (t): $t = \frac{Dn}{Dh}$, h	20h 00'	25h 00'	30h 00'	30h 00'
Εύρος άρδευσης (I): $I = \frac{Dn}{ET_d}$, ημέρες	≈9	≈8	≈8	≈10

Όπου RD το βάθος ριζοστρώματος, C ο συντελεστής εξάντλησης υγρασίας και P το ποσοστό διαβροχής του εδάφους.

Όπου St η απόσταση των φυτών επί της γραμμής, Sr η απόσταση σποράς, Se η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων, q η παροχή κάθε σταλακτήρα και Ed ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.

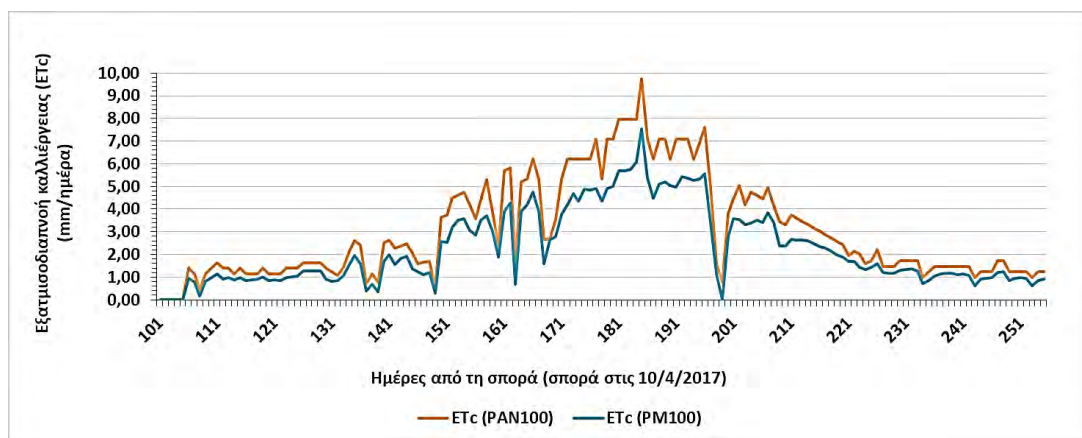
Το εύρος άρδευσης εφαρμόστηκε κάθε τέσσερις ημέρες, δηλαδή μικρότερο από αυτό που είχε υπολογιστεί, ώστε να γίνεται πλήρης αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της στάγδην άρδευσης.

5.5. Εξαμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

Στο Διάγραμμα 5.3 παρουσιάζεται η εξαμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2017 όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο του απλού εξαμισιμέτρου τύπου A (PAN100) και της μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO (PM100).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας φυσιολογικά αυξάνεται κατά τη διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης και μειώνεται προς το στάδιο ωρίμανσης. Η υψηλότερη τιμή της εξατμισοδιαπνοής και στις δύο μεθόδους άρδευσης παρατηρήθηκε κατά την 185^η ημέρα από την αρχή του έτους και είχε την τιμή 9,74mm για τη μεταχείριση PAN100 και 7,53mm για τη μεταχείριση PM100. Η συνολική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας για τη μέθοδο άρδευσης του απλού εξατμισιμέτρου υπολογίστηκε ίση με 472,65mm, τιμή ελαφρώς μικρότερη και μη στατιστικώς σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σε σχέση με τη συνολική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας για τη μέθοδο άρδευσης κατά Penman-Monteith κατά FAO, η οποία ήταν ίση με 350,41mm.

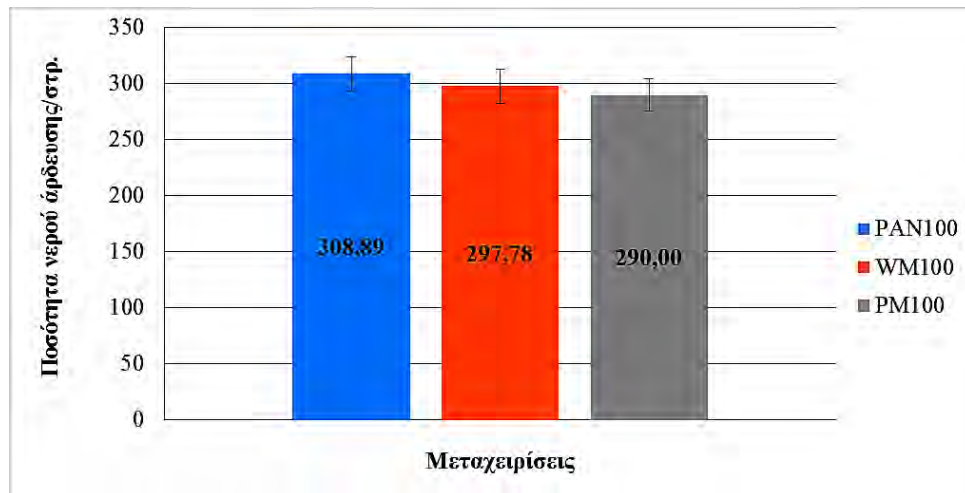
Οι απότομες πτώσεις των τιμών της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας οφείλονται στις βροχοπτώσεις.



Διάγραμμα 5.3. Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2017.

5.6. Εφαρμοζόμενη ποσότητα και εξοικονόμηση αρδευτικού νερού

Στο Διάγραμμα 5.4 παρουσιάζονται οι συνολικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν στις μεταχειρίσεις όπως αυτές προέκυψαν από τις καταγραφές των υδρομέτρων.



Διάγραμμα 5.4. Εφαρμοσθείσες ποσότητες νερού στάγδην άρδευσης (mm).

Στις ποσότητες αυτές δεν συμπεριλαμβάνεται η ωφέλιμη ή ενεργός βροχόπτωση. Στην μεταχείριση PAN100 εφαρμόστηκαν συνολικά 308,89mm νερού μέσω της άρδευσης, ενώ στις μεταχειρίσεις WM100 και PM100 297,78 και 290mm νερού αντίστοιχα.

Οι γραμμές σφάλματος που απεικονίζονται εκφράζουν 5% πιθανά θετικά και αρνητικά ποσά σφάλματος στα αποτελέσματα του πειράματος.

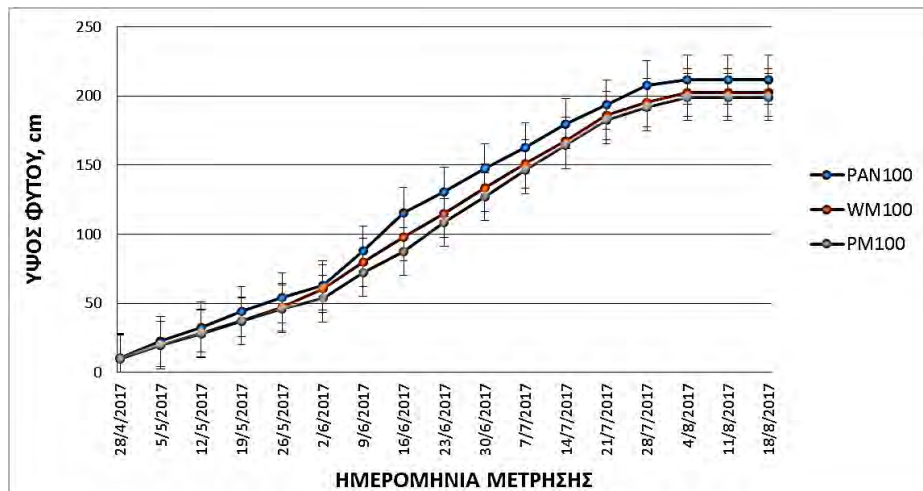
Από τη στατιστική ανάλυση οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η εξοικονόμηση νερού που επιτυγχάνεται μεταξύ των μεταχειρίσεων PAN100 και PM100 είναι 6,1%, μεταξύ των μεταχειρίσεων PAN100 και WM100 είναι 3,6%, ενώ μεταξύ των μεταχειρίσεων PM100 και WM100 είναι 2,6%.

5.7. Ύψος φυτών

Στο Διάγραμμα 5.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ύψους των φυτών του αραβοσίτου στις διάφορες μεταχειρίσεις.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2017 η μεταχείριση PAN100 παρουσίασε μια τάση υπεροχής έναντι των υπολοίπων μεταχειρίσεων. Ειδικότερα, το υψηλότερο μέσο ύψος φυτών ήταν 211,83cm στη μεταχείριση PAN100. Ακολουθούσε η μεταχείριση WM100 και η μεταχείριση PM100.



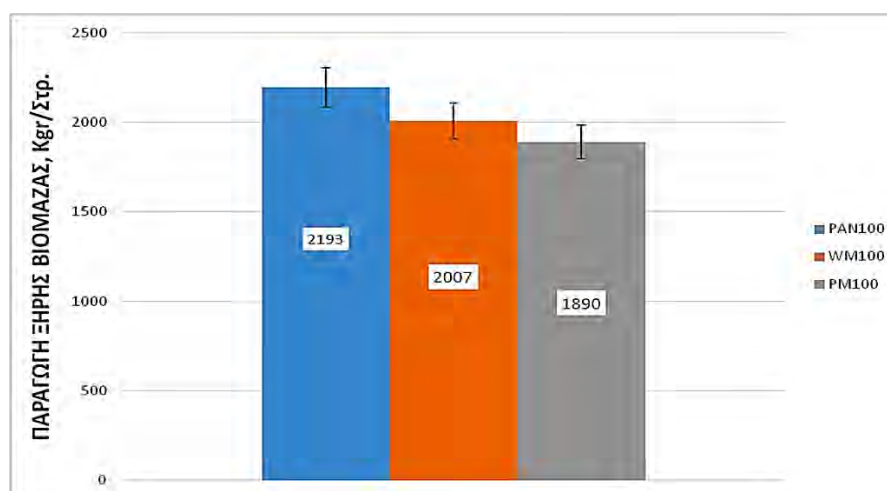
Διάγραμμα 5.5. Μέσοι όροι του ύψους των φυτών του αραβοσίτου στις διάφορες μεταχειρίσεις.

Από την στατιστική ανάλυση δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ως προς το ύψος των φυτών μεταξύ των μεταχειρίσεων. Οι γραμμές σφάλματος που απεικονίζονται εκφράζουν 5% πιθανά θετικά και αρνητικά ποσά σφάλματος στα αποτελέσματα του πειράματος.

5.8. Παραγωγή ξηρής βιομάζας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της ξηρής βιομάζας του υπέργειου μέρους των φυτών για τις διάφορες μεταχειρίσεις εκφρασμένες σε kg/στρ..

Στο Διάγραμμα 5.6 η ξηρή βιομάζα της μεταχείρισης PAN100 ανέρχεται στα 2193kg/στρ., της μεταχείρισης WM100 στα 2007kg/στρ. και της μεταχείρισης PM100 στα 1890kg/στρ.. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές δεν υπάρχουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



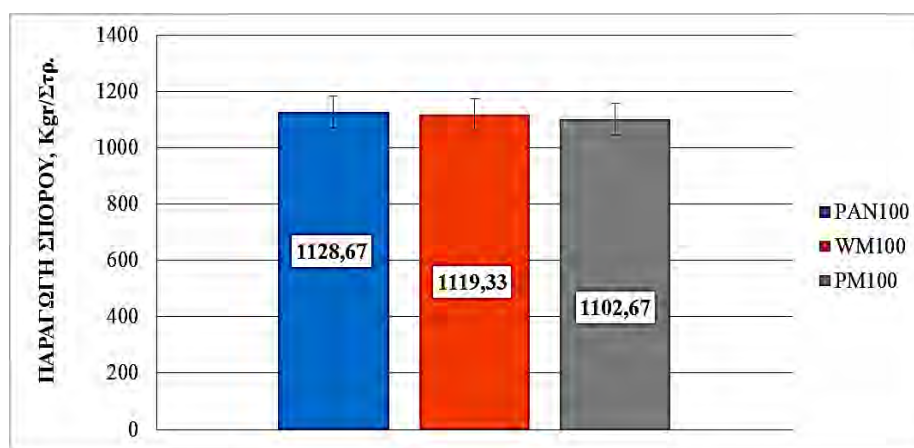
Διάγραμμα 5.6. Παραγωγή ξηρής βιομάζας της καλλιέργειας σε kg/στρ. ανά μεταχείριση.

5.9. Παραγωγή σπόρου

Στο Διάγραμμα 5.7 παρουσιάζεται η παραγωγή σε καρπό (kg/στρ.) της καλλιέργειας που μελετήθηκε, για τις διάφορες μεταχειρίσεις.

Παρατηρείται ότι η μεταχείριση PAN100 δίνει τη μεγαλύτερη παραγωγή καρπού (1128,67kg/στρ.). Ακολουθεί η μεταχείριση WM100 (1119,33kg/στρ.) και τρίτη η μεταχείριση PM100 (1102,67kg/στρ.).

Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Διάγραμμα 5.7. Παραγωγή σε καρπό της καλλιέργειας σε kg/στρ. ανά μεταχείριση.

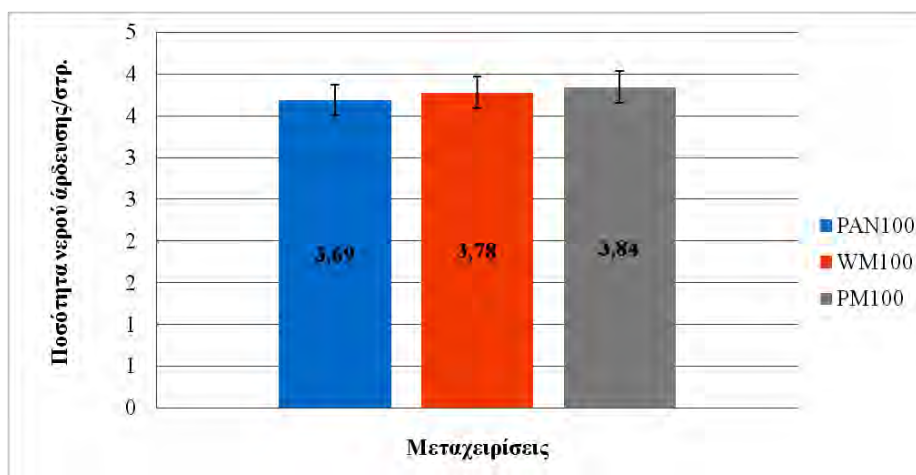
5.10. Αποδοτικότητα χρήσης νερού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την αποδοτικότητα χρήσης νερού της καλλιέργειας στις αρδευόμενες μεταχειρίσεις βάσει της παραγωγής σε ξηρό βάρος.

Οι γραμμές σφάλματος που απεικονίζονται εκφράζουν 5% πιθανά θετικά και αρνητικά ποσά σφάλματος στα αποτελέσματα του πειράματος.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Bos (Παράγραφος 4.14) με αριθμητή την παραγωγή ξηρού βάρους για επίπεδο άρδευσης i και παρονομαστή την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για επίπεδο άρδευσης i .

Από την μελέτη της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) προκύπτει ότι η μεταχείριση PM100 εφαρμόζει αποδοτικότερα το νερό της άρδευσης (Διάγραμμα 5.8).



Διάγραμμα 5.8. Μέσοι όροι της αποδοτικότητας χρήσης νερού της καλλιέργειας βάσει της παραγωγής σε ξηρό βάρος (kg/m^3) στις αρδευόμενες μεταχειρίσεις.

5.11. Συζήτηση

Η εξοικονόμηση νερού που επιτυγχάνεται μεταξύ των μεταχειρίσεων PAN100 και PM100 είναι 6,1%, μεταξύ των μεταχειρίσεων PAN100 και WM100 είναι 3,6%, ενώ μεταξύ των μεταχειρίσεων PM100 και WM100 είναι 2,6%.

Επίσης, το νερό χρησιμοποιήθηκε αποδοτικότερα από την καλλιέργεια με την εφαρμογή της μεθόδου Penman-Monteith.

Η μεταχείριση του απλού εξατμισιμέτρου τύπου A (PAN100) παρουσίασε μια τάση υπεροχής έναντι των υπολοίπων μεταχειρίσεων στο ύψος φυτών καθώς το εξατμισόμετρο κάνει μια υπερκτίμηση του αρδευτικού νερού.

Η μεταχείριση του απλού εξατμισιμέτρου τύπου A (PAN100) δίνει τη μεγαλύτερη παραγωγή ξηρής βιομάζας και σπόρου.

Η καλλιέργεια του αραβοσίτου στην Ελλάδα μπορεί να αποφέρει ακόμη σημαντικότερα κέρδη στον παραγωγό όταν με την εφαρμογή κατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών μειωθούν οι δαπάνες παραγωγής.

Τέλος, η χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων άρδευσης έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως τη μείωση μετακινήσεων από και προς τον αγρό, τη βελτιστοποίηση της χρήσης νερού και την αποφυγή καταναλισκόμενης ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου, Ι. και Παπαμιχαήλ, Δ. (1996). Εφαρμογή των Γεωστατιστικών Μεθόδων στη Μελέτη της Χωρικής Μεταβλητότητας της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Εγγειοβελτιωτικά Έργα - Διαχείριση υδατικών πόρων - Εκμηχάνιση γεωργίας. ΓΕΩ.ΤΕ.Ε, Λάρισα, Τόμος Α, σελ. 223-245.
- Αλεξίου, Ι., Κωτσόπουλος, Σ.Ι., Καρφούντζος, Δ. και Βύρλας, Π. (2000). Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας. Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Αθήνα, σελ. 493-500.
- Ασημιάδης, Σ. (1982). Το καλαμπόκι και η καλλιέργεια του. Σύγχρονη γεωργική τεχνολογία 7:19-22.
- Γαλανοπούλου-Σενδούκα, Σ. (1998). Ειδική Γεωργία Ι. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος.
- Γεωργίου, Π., Παπαμιχαήλ, Δ. και Παπαζαφειρίου, Ζ. (2000). Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη βοήθεια εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς στην Ελλάδα. Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας-Φυσικής της Ατμόσφαιρας. Θεσσαλονίκη, σελ. 395-402.
- Δαλιάνης, Δ.Κ. (1999). Ανοιξιάτικα σιτηρά. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
- Καρφούντζος, Δ. (2002). Υδατοκατανάλωση Καλλιεργειών. Διδακτικές Σημειώσεις, Βόλος.
- Καρατάσιου, Ε. (2017). Συγκριτική ανάλυση αυτοματοποιημένων συστημάτων άρδευσης. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Καρατάσιου, Ε., Παπανικολάου, Χ., Αγγελάκη, Α., Γιουβάνης, Β., Δημάκας, Δ., Μπότα, Β., Χαλκίδης, Η., Σακκελαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. (2019). Προγραμματισμός άρδευσης με χρήση Watermarks. Πρακτικά 14^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 16-17 Μαΐου, Βόλος.
- Μορόπουλος, Ν. (2005). Αυτοματισμός, Τηλεμετρία και Πληροφορική. Σύγχρονα Εργαλεία της Ευφυούς και Οικολογικής Γεωργικής Ανάπτυξης. Αθήνα.

- Παπαζαφειρίου, Ζ. (1999). Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζαφειρίου, Ζ. και Παπαμιχαήλ, Δ. (1996). Συστήματα αρδεύσεων, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαμιχαήλ, Δ., Κωτσόπουλος, Σ., και Γεωργίου, Π. (1994). Συγκριτική Ανάλυση των Έμμεσων Μεθόδων Εκτίμησης της Εξατμισοδιαπνοής της Καλλιέργειας Αναφοράς. Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας-Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, σελ. 35-43.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Γεωργίου, Π.Ε. (1999). Συγκριτική ανάλυση των ωριαίων και ημερήσιων εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Βόλος, Τεύχος Α, σελ. 183-189.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. (1996). Άρδευση με σταγόνα. Άρδευση με αυλάκια. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Στρουθόπουλος, Θ. (1995). Λεξικό όρων τευτλοκαλλιέργειας. Θεσσαλονίκη.
- Τερζίδης, Γ. και Παπαζαφειρίου, Ζ. (1997). Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Τζουρμακλιώτης, Β. (2013). Άρδευση καλλιεργειών εξ' αποστάσεως με αυτοματισμούς. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2010. Οι υδατικές ανάγκες των αρδευόμενων καλλιεργειών. Έκδοση 9η. Λευκωσία, Κύπρος.
- Allen, B.L. (2012). Dryland corn yield affected by row configuration and seeding rate in the northern Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(1):32-41.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO Irrigation and Drainage*, 56:1-194.
- Bagnouls, F. and Gaussen, H. (1953). Saison seche et indice xerothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. de Toulouse*, 88:193-240.
- Bos, M.G. (1979). Standards for Irrigation Efficiencies of ICID. *J. Irrig. Drain. Div.*, 105:37-43.

Bradley, K. W. (2006). A review of the effects of row spacing on weed management in corn and soybean. Online. Crop Management.

Caceres, R., J. Casadesus and O. Marfa (2007). Adaptation of an automatic irrigation-control tray system for outdoor nurseries. *Biosystems Engineering*, 96 (3): 419-425.

Dukes, M.D., E.H. Simonne, W.E. Davis, D.W. Studstill, and R. Hochmuth (2003). Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. *Proc. Int. Conf. Irrig. Drain.* 2:665–674.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements, FAO-ONU, Irrigation and Drainage Paper no. 24 (rev.), pp. 144, Rome.

Dursun, M. and Ozden, S. (2011) A Wireless Application of Drip Irrigation Automation Supported by Soil Moisture Sensors. *Scientific Research and Essays*, 6, 1573-1582.

Elmore, R. and Abendroth, L. (2008). Seeding Rates in Relation to Maximum Yield and Seed Costs. *Integrated Crop Management News and Iowa State University Extension*. Available at: <http://www.extension.iastate.edu/CropNews/>

Evans, R., Sheed, R.E., Cassel, D.K. (1996). Irrigation scheduling to improve water and energy use efficiencies. North Carolina Cooperative Extension Service.

FAO (2005). Grassland Species Profiles. Detailed descriptions and photos of more than 600 grassland species. FAO Publications.

Filintas, A., Dioudis, P., Hatzopoulos, J. and Karantounias, G. (2008). Irrigation effects in Maize yield, plant stress and GIS integrated modelling of available soil moisture. In: *Proc. of International Conference “Studying, Modeling and Sense Making of Planet Earth”*, June 1-6, University of the Aegean, Department of Geography, Mytilene, Lesvos, Greece, pp.1-8.

Gökmen, S., Sencar, O., Sakin, M.A. (2001). Response of popcorn (*Zea mays everta*) to nitrogen rates and plant densities. *Turk. J. Agric. For.*, 25:15-23.

Hannaway, D.B. and Larson, C. (2004). Corn (*Zea mays L.*). The Forage Information System- Oregon State University. Available at: <http://forages.oregonstate.edu/>

Howell, T.A. (2001). Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. *Agronomy Journal* 93:281-289.

Howell, T., Evett, S., Tolk, J., Schneider, A., Steiner, J. (1996). Evapotranspiration of corn Southern high plains. In: Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Nov. 3-6. American Society of Agricultural and Biological Engineers, San Antonio, TX, USA.

Irrrometer (2010). Watermark soil moisture sensor – Model 200SS. Specification Document. Irrrometer Company, Inc. P.O. Box 2424, Riverside, C.A. 92516.

Iowa State University (2001). Corn Planting Guide. Iowa State University Extension Service.

Johnson, R. (2011). Corn–What Seeding Rate to Use. University of Delaware Kent County Agricultural Extension. Available at: <https://extension.udel.edu/kentagextension>

Jones, H.G. (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2427-2436.

Kara, T., Biber, C. (2008). Irrigation frequencies and corn (*Zea mays L.*) yield relation in northern Turkey. *Pakistan journal of biological sciences*, 11(1):123-126.

Keller J. and Karmeli, D. (1974) “Trickle irrigation design for optimal soil wetting”, Proc. 2nd Int. Drip Irrigation Conference, San Diego, California, pp. 240-251.

Kotsopoulos, S. and Babajimopoulos, C. (1997). Analytical estimation of modified Penman equation parameters. *J. Irrig. and Drain. Engng. ASCE* 123 (4): 253-256.

Kranz, W.L., Irmak, S., Van Donk, J., Yonts, C.D., Martin, D.L. (2008). Irrigation Management for Corn. NebGuide. University of Nebraska - Lincoln Extension.

Larson, K., Thompson, D. and Harn, D. (2001). Limited and Full Irrigation Comparison for Corn and Grain Sorghum. Colorado State University.

Lee, C. (2009). Corn Seeding Rates, 2004-2008: Research Update. University of Kentucky. Available at: <http://www.uky.edu/Ag/GrainCrops/welcome.htm>.

Monteith, J.L. (1993). The exchange of water and carbon by crops in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 14:85-91.

Nagy, J. (2003). Effect of Irrigation on Maize Yield (*Zea mays L.*). Debreceni Egyetem. Agrartudományi Közlemények.

- Nemali KS, van Iersel, MW. (2006). An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants *Scientia Horticulturae* 110 292–297
- Noble, A., Hema, P.S., Saritha, E.K and Shinoj, S. (1999). Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. *Agricultural Water Management*. 45: 145-157.
- Olson, T.C. (1971). Yield and water use by different populations of dryland corn, grain sorghum, and forage sorghum in the western corn belt. *Agronomy Journal*, 63:104-106.
- Onyago, C.O. (2009). Decreased row spacing as an option for increasing maize (*Zea mays L.*) yield in Trans Nzoia district, Kenya. *Plant Breed & Crop Sci.*, 1(8):281-283.
- Papamichail, D. and Alexiou, J. (1998). Application of the Theory of Regionalized Variables for Estimating Reference Evapotranspiration in Greece. *Proceedings of an International Conference, Sani Halkidiki, Protection and Restoration of the Environment IV, Volume I*, 222-229.
- Papamichail, D.M. and Terzidis, G. (1996). Assessment of the meteorological parameters effects on the daily Penman reference crop evapotranspiration. In *Second International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (1)*: 281–288, Chania (Greece).
- Papanikolaou, C., & Sakellariou-Makrantonaki, M.A. (2012). The effect of an intelligent surface drip irrigation method on sorghum biomass, energy and water savings. *Irrigation Science*, 31, 807-814.
- Papazafiriou, Z.G. (1996). Crop evapotranspiration: regional studies in Greece. In: *Proceedings of International Symposium of Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, European Commission, pp. 275-286.
- Phene, C.J., Allee, C.P. and Pierro, J. (1989). Measurement of soil matric potential and real time irrigation scheduling. *Agric. Water Management* 16 (3): 173-185.
- Quintana, J.M. and Diaz, J.L. (1971). Importance of the Irrigation of corn (*Zea mays L.*) during the maximum rate of transpiration period. 16th Annual New Mexico Water Conference - Water, a key to a quality environment. 25-26 March.

Samuelsson, R., Burvall, J. and Jirjis, R. (2006). Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. *Biomass and Bioenergy*, 30(11):929-934.

Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J., Gupta, S.C. and Cheng, H.H. (1996). Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *J. Environ. Qual.*, 25:982-992.

Shaw, R. (1988). Climate Requirement. In *Corn and Corn Improvement*. Edited by Sprague G.F. and J.W. Dudley. American Society of Agronomy and Academic Press. Madison, Wisconsin, USA.

Turgut, I., Duman, A., Bilgili, U. and Acikgoz, E. (2005). Alternate Row Spacing and Plant Density Effects on Forage and Dry Matter Yield of Corn Hybrids (*Zea mays L.*). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191:146-151.

Vellidis G, Tucker M, Perry C, Kvien C, Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Comput. Electron. Agric.*, 61: 44-50.

Viets, F.G. 1962. Fertilizers and the Efficient Use of Water. *Advances in Agronomy* 14:223-264.

www.minagric.gr

www.gaiapedia.gr