



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος**

Εργαστήριο Ζιζανιολογίας

Πτυχιακή εργασία

Παναγιώτης Ηλιάδης

**‘Επίδραση της αυξημένης αλατότητας στην φυσιολογία του
κρίταμου όταν αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδραιοπονίας’**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Ευθυμία Λεβίζου, Επίκουρη Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών

Βόλος, 2020

«Επίδραση της αυξημένης αλατότητας στην φυσιολογία του κρίταμου όταν αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρειοπονίας»

“Effect of increased salinity on the physiology of sea fennel grown in an aquaponic system”

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Λεβίζου Ευθυμία: (επιβλέπουσα) Επίκουρη Καθηγήτρια, Εργαστήριο Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Κατσούλας Νικόλαος: (μέλος) Καθηγητής, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών-Θερμοκήπια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πετούμενου Δέσποινα: (μέλος) Λέκτορας, Εργαστήριο Αμπελουργίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
1.Εισαγωγή.....	6
1.1.Ιστορικά στοιχεία.....	7
1.2.Κρίταμο.....	7
1.3.Υδροπονία.....	8
1.4.Ενυδρειοπονία-Aquaponics.....	8
1.5.Ενυδρειοπονία και συνθήκες καταπόνησης.....	10
1.6.Ενυδρειοπονία με υφάλμυρο νερό.....	11
1.7.Σκοπός της εργασίας.....	12
2.Υλικά και μέθοδοι.....	13
2.1.Πειραματικές συνθήκες.....	13
2.2.Συστήματα Ενυδρειοπονίας.....	13
2.3.Πειραματικό μέρος.....	15
2.3.1.Μετρήσεις-Φθορισμός χλωροφύλλης <i>a in vivo</i>	16
2.3.2.Μετρήσεις-Ανακλαστικότητα φύλλων.....	16
2.3.3.Μετρήσεις-SPAD.....	17
2.4.Τελική συλλογή.....	17
2.5.Πρότυπη καμπύλη χλωροφυλλών.....	18
2.6.Στατιστική ανάλυση.....	20
3.Αποτελέσματα.....	21
3.1.Αναπτυξιακές μετρήσεις.....	21
3.1.1.Νωπό βάρος Υπέργειου.....	21
3.1.2.Ξηρό βάρος Υπέργειου.....	22
3.1.3.Ξηρό βάρος Ρίζας.....	23
3.1.4.Αναλογία Ρίζας προς Υπέργειο.....	24
3.2.Ανακλαστικότητα.....	25
3.2.1.Δείκτης PRI.....	25
3.2.2.Δείκτης ΔPRI.....	27

3.2.3. Δείκτης NDI.....	28
3.3. Φθορισμός.....	29
3.3.1. F_v/F_m	29
3.3.2. $P_{i_{total}}$	30
3.4. Συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών.....	31
4. Συζήτηση.....	32
4.1. Επίδραση της αυξημένης αλατότητας σε σύστημα ενυδραιοπονίας στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του κρίταμου.....	32
4.2. Επίδραση της αυξημένης αλατότητας σε σύστημα ενυδραιοπονίας στις βιοχημικές παραμέτρους του κρίταμου.....	34
5. Συμπεράσματα.....	37
Βιβλιογραφία.....	38

Το παρακάτω κείμενο υπογράφεται από τον φοιτητή, Παναγιώτη Ηλιάδη, που εκπόνησε την πτυχιακή εργασία.

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενυδρειοπονία (*aquaponics*) ονομάζεται το σύστημα της ταυτόχρονης καλλιέργειας φυτών και ψαριών. Αποτελεί ένα κλειστό ανατροφοδοτούμενο σύστημα που συνδυάζει την ιχθυοκαλλιέργεια και την υδροπονία. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη παραγωγή κρίταμου (*Crithmum maritimum*) με λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) σε υφάλμυρο νερό. Σκοπός του πειράματος ήταν η εκτίμηση της ανάπτυξης και φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φυτών του κρίταμου σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό τριών επιπέδων αλατότητας. Τα κρίταμα, αφού πέρασαν μία περίοδο εγκλιματισμού στα επίπεδα αλατότητας που χρησιμοποιήθηκαν, τοποθετήθηκαν σε εννιά ανεξάρτητα συστήματα ενυδρειοπονίας όπου τους επιβλήθηκαν τρεις μεταχειρίσεις αλατότητας (14, 23 και 32dS m⁻¹). Το πείραμα διήρκεσε συνολικά 65 ημέρες και κατά την διάρκεια του, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις (ανά 10-15 ημέρες) του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo*, της ανακλαστικότητας των φύλλων και της συγκέντρωσης των ολικών χλωροφυλλών. Κατά τη λήξη του πειράματος έγινε η τελική συλλογή των φυτών για να καταγραφούν τα αναπτυξιακά τους χαρακτηριστικά. Τα αυξανόμενα επίπεδα αλατότητας προκάλεσαν αντίστοιχες και στατιστικώς σημαντικές μειώσεις στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών σε σχέση με το μάρτυρα (14dS m⁻¹) και πιο συγκεκριμένα στο νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου και το ξηρό βάρος της ρίζας. Οι παράμετροι φθορισμού, κυρίως το Pi_{total} και λιγότερο το Fv/Fm , ο δείκτης ανακλαστικότητας NDI και η διακύμανση των επιπέδων χλωροφυλλών παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο, καθώς κατά τον 1^ο μήνα του πειράματος οι τιμές τους εμφανίστηκαν μειωμένες και παρέπεμπαν σε αυξημένη καταπόνηση, τα φυτά όμως φάνηκαν να ανακάμπτουν κατά τον 2^ο μήνα της αναπτυξιακής περιόδου. Σε όλες αυτές τις παραμέτρους τα φυτά-μάρτυρες (14dS m⁻¹) εμφάνισαν μεγαλύτερες τιμές που αποτυπώθηκαν και στην καλύτερη τους ανάπτυξη. Συμπερασματικά, το κρίταμο αποδείχτηκε αρκετά ανθεκτικό σε πολύ υψηλά επίπεδα αλατότητας, χωρίς όμως να αποφεύγει μειώσεις της ανάπτυξης, ενώ καταγράφηκαν και σημαντικές αλλαγές στη φυσιολογία του.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η προέλευση της ενυδραιοπονίας δεν έχει διευκρινιστεί σε απόλυτο βαθμό. Η πρώτη προσπάθεια για την δημιουργία συστημάτων ενυδραιοπονίας σε εμπορική κλίμακα έγινε στο Πανεπιστήμιο των Παρθένων Νήσων από τον *Dr. James Rakocy* όπου έγινε συγκαλλιέργεια οπωροκηπευτικών και του ψαριού τιλάπια (*Rakocy, 1989*). Η προσπάθειά αυτή αποτέλεσε την πρώτη σύγχρονη εφαρμογή των τεχνικών της ενυδραιοπονίας. Ιστορικές αναφορές όμως, αποδεικνύουν πως η ενυδραιοπονία δεν αποτελεί καινούργια τεχνολογία, καθώς φαίνεται να αξιοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον πολιτισμό των Αζτέκων που κατοικούσαν στην περιοχή του Κεντρικού Μεξικού κατά την περίοδο 1150-1350 π.Χ. (*Turcios and Papenbrock, 2014*). Τέλος, οι βάσεις της σύγχρονης ενυδραιοπονίας θεμελιώθηκαν την δεκαετία του '70 στο New Alchemy Institute του North Carolina State University (*Goddek et al., 2015*).

1.2 Κρίταμο

Το κρίταμο ή κρίθμον το παραθαλάσσιο (*Crithmum maritimum*) είναι ένα αρωματικό και φαρμακευτικό εδώδιμο φυτό που ανήκει στην κατηγορία των αλόφυτων της οικογένειας *Apiaceae*, της τάξης *Apiales* και συχνά το συναντάμε σε παραθαλάσσιες περιοχές, σε περιοχές με υποβαθμισμένα αλατούχα εδάφη αρκεί βέβαια αυτά να έχουν καλή στράγγιση. Ακριβώς επειδή το κρίταμο ευδοκίμει σε εδάφη με έντονη την παρουσία αλατότητας, κατατάσσεται και στην κατηγορία των αλόφυτων. Τα φυτά αυτής της κατηγορίας έχουν αναπτύξει μηχανισμούς άμυνας και προσαρμογής σε τέτοια οικοσυστήματα (*Ben Hamed et al, 2004*). Το κρίταμο είναι γνωστό από την αρχαιότητα για τις ευεργετικές του ιδιότητες αλλά και για την πλούσια διατροφική του αξία καθώς αποτελεί πηγή βιταμινών όπως η C, E και K, ωμέγα 3 λιπαρών αλλά και πολλών μετάλλων όπως το ιώδιο (Κρίταμο-Το εναλλακτικό βότανο για το φαγητό)(Πρόσβαση στις 25/11/2019).

1.3 Υδροπονία

Υδροπονία είναι η μέθοδος καλλιέργειας φυτών όπου αυτά δεν τοποθετούνται στο έδαφος αλλά σε κάποιο εδαφικό υπόστρωμα που περιέχει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη τους. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι υδροπονικές καλλιέργειες που γίνονται σε νερό και αυτές που γίνονται σε αδρανή υποστρώματα όπως ο περλίτης. Το υπόστρωμα αποτελεί και τον χώρο όπου αναπτύσσεται η ρίζα του φυτού. Η υδροπονία είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την καλλιέργεια φυτών ειδικά σε περιοχές με πολύ φτωχό εδαφικό υπόστρωμα.

Στις σύγχρονες καλλιέργειες εκτός εδάφους, η τροφοδότηση των φυτών με νερό και θρεπτικά στοιχεία βασίζεται στην χορήγηση ενός τεχνητά παρασκευασμένου θρεπτικού διαλύματος. Οι ρίζες αναπτύσσονται είτε απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα είτε σε πορώδη στερεά υλικά, τα οποία καλούνται υποστρώματα και διαβρέχονται τακτικά με θρεπτικό διάλυμα το οποίο καλύπτει παράλληλα και τις ανάγκες των φυτών. Τα θρεπτικά στοιχεία βρίσκονται διαλυμένα στο νερό κατά κανόνα ως ιόντα ανόργανων αλάτων. Εξαιρέση αποτελούν το βόριο, το οποίο περιέχεται ως ευδιάλυτη ανόργανη χημική ένωση (βορικό οξύ) και ο σίδηρος, ο οποίος περιέχεται σε μορφή ευδιάλυτων χηλικών ενώσεων.

Ως υπόστρωμα υδροπονικών καλλιεργειών μπορεί να θεωρηθεί κάθε φυσικό ή προερχόμενο από βιομηχανική επεξεργασία πορώδες υλικό. Εφόσον το θρεπτικό διάλυμα με το οποίο τροφοδοτούνται τα υποστρώματα περιέχει όλα τα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται τα φυτά για να αναπτυχθούν και να συμπληρώσουν τον βιολογικό τους κύκλο, τα υποστρώματα μπορούν να υποκαθιστούν πλήρως το έδαφος ως μέσον ανάπτυξης των καλλιεργειών. Τα περισσότερα υποστρώματα υδροπονίας συμπεριφέρονται χημικώς ως αδρανή υλικά στις συνηθισμένες συνθήκες καλλιέργειας. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά δεν αποδίδουν θρεπτικά στοιχεία στο θρεπτικό διάλυμα ούτε δεσμεύουν ιόντα που υπάρχουν ήδη σε αυτό.

1.4 Ενυδραιοπονία-Aquaponics

Ενυδραιοπονία είναι η ταυτόχρονη παραγωγή φυτών και ψαριών σε ένα κλειστό σύστημα επανακυκλοφορίας νερού που σήμερα θεωρείται ως η πλέον

ωφέλιμη αειφορική τεχνική. Ο όρος Aquaponics ετυμολογικά, δημιουργήθηκε από τη σύντμηση 2 λέξεων, της λατινικής "aqua" (που σημαίνει νερό) και της αρχαιοελληνικής "πόνος" (που μεταξύ άλλων σημαίνει εργασία). Αποτελεί την σύνθεση των λέξεων aquaculture και hydroponics, υποδηλώνοντας ακριβώς τον συνδυασμό της υδατοκαλλιέργειας (aquaculture) και της υδροπονίας (hydroponics). Περιλαμβάνει με λίγα λόγια μία υδροπονική εγκατάσταση και μία υδατοκαλλιέργεια. Μέχρι στιγμής έχουν δοκιμαστεί πάνω από 150 είδη φυτών, λαχανικών και αρωματικών, σε συστήματα ενυδρείοπονίας (Love et al., 2015). Σε γενικές γραμμές όλα τα φυτά που καλλιεργούνται σε υδροπονικές μονάδες μπορούν να καλλιεργηθούν με επιτυχία και στα συστήματα ενυδρείοπονίας. Συνήθως τα φυτά που το εδάδιμό τους μέρος βρίσκεται στη ρίζα (π.χ. πατάτες, καρότα) φαίνεται να μην ευνοούνται τόσο από τη συνεχή παροχή νερού, όσο τα υπόλοιπα είδη φυτών. Προτιμώνται οι καλλιέργειες των φυλλωδών λαχανικών, όπως του μαρουλιού και φρέσκων αρωματικών, όπως ο βασιλικός, καθώς μπορούν να ενσωματωθούν πιο εύκολα σε ένα ενυδρείοπονικό σύστημα (Rakocy et al. 2006), αλλά και δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα φυτά, συνδυάζουν μεγάλη καταναλωτική ζήτηση, έχουν μικρό κύκλο ανάπτυξης, χαμηλές λιπαντικές ανάγκες –με έμφαση στην αζωτούχα λίπανση και ανθεκτικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Σε μία ενυδρείοπονική καλλιέργεια η μεταφορά του νερού γίνεται μέσω του κλειστού συστήματος των σωληνώσεων από και προς τις κλίνες των φυτών (grow beds). Ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος στηρίζεται στην κυκλοφορία του νερού από τη δεξαμενή των ψαριών διαμέσου ενός φίλτρου βακτηρίων προς το υδροπονικό τμήμα αφού έχει μεσολαβήσει η διαδικασία της νιτροποίησης της αμμωνίας από τα βακτήρια που βρίσκονται στα φίλτρα.

Από την δεξαμενή δηλαδή των ψαριών (fish tanks) το νερό μαζί με τα προϊόντα του μεταβολισμού των ψαριών πηγαίνει προς το βιολογικό φίλτρο το οποίο μετατρέπει την αμμωνία σε νιτρικά, τα οποία ξανά μέσω της ροής του νερού και των σωληνώσεων καταλήγουν στην δεξαμενή που βρίσκονται τα grow beds και προσλαμβάνονται από τις ρίζες των φυτών. Τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά που προσλαμβάνονται από τα φυτά προέρχονται από την πέψη και τη απέκκριση των ψαριών (Tyson et al., 2011) όπου μέσω του κύκλου του αζώτου και των υπεύθυνων μικροοργανισμών που βρίσκονται στο βιολογικό φίλτρο η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρικά. Σύμφωνα με τους Rakocy et al, (2006) η φυσιολογία των ψαριών και η

σύσταση των ιχθυοτροφών σε πρωτεΐνες είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στο διάλυμα μέσα στο σύστημα. Οι ιχθυοτροφές πρέπει είναι πλούσιες σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, βιταμίνες και λιπίδια, γεγονός που καθιστά περιττή την προσθήκη υδροπονικών θρεπτικών διαλυμάτων. Αντίθετα, παρέχουν τα περισσότερα από τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται από τα φυτά, αν και απαιτείται κάποια συμπλήρωση με Ca, K και Fe μέσω της προσθήκης βασικών ενώσεων όπως για παράδειγμα υδροξείδιο του ασβεστίου και υδροξείδιο του καλίου για τη ρύθμιση του pH και την αποφυγή τροφωπενιών. Ο σίδηρος προστίθεται σε χηλική μορφή (Walker et al.2001). Ειδικά για το K στα συστήματα ενυδρείοπονίας πρέπει να υπάρχει ειδική μέριμνα χορήγησής του καθώς μπορεί σε συνθήκες υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων Na και Cl, τα οποία ανταγωνίζονται την πρόσληψη άλλων ιόντων, να προκληθεί άνοδος του pH και να παρουσιαστεί έντονη τοξικότητα στα φυτά.

Οι μικροοργανισμοί του συστήματος είναι μια ομάδα αυτότροφων βακτηρίων (Nitrosomonas) που μετατρέπουν την αμμωνία (NH_3) σε νιτρώδη (NO_2^-) και στη συνέχεια ένα άλλο γένος νιτροποιητικών βακτηρίων (Nitrobacter) μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά (NO_3^-) (Rakocy et al., 2006). Η αμμωνία και τα νιτρώδη είναι τοξικά για το σύστημα (Goddek et al., 2015). Ακίνδυνα και ευκολότερα αξιοποιήσιμη μορφή πρόσληψης για τα φυτά αποτελούν τα νιτρικά μετά την διαδικασία της νιτροποίησης.

1.5 Ενυδρείοπονία και συνθήκες καταπόνησης

Συνθήκη καταπόνησης ορίζεται οποιοσδήποτε εξωτερικός παράγοντας είναι ικανός να επηρεάσει την φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού, την αναπαραγωγική του ικανότητα αλλά και την ίδια την επιβίωσή του (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Οι καταπονήσεις μπορούν να οφείλονται σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Βιοτικοί είναι εκείνοι οι παράγοντες καταπόνησης που έχουν να κάνουν με άλλους ζωντανούς οργανισμούς, μεταξύ άλλων, ένας μύκητας ή μια προσβολή από κάποιο έντομο ή ακόμη και ο ανταγωνισμός μεταξύ φυτών. Αβιοτικός μπορεί να χαρακτηριστεί ένας παράγοντας καταπόνησης που προκύπτει από την επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στο φυτό. Παράδειγμα αβιοτικής καταπόνησης αποτελεί

και η αυξημένη αλατότητα στο έδαφος ή σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα η παρουσία υφάλμυρου νερού.

Στην ενυδρειοπονία έχουν μελετηθεί και έχουν δημοσιευτεί έως τώρα ελάχιστες εργασίες που έχουν να κάνουν με κάποια μορφή καταπόνησης στα φυτά και πως αυτή επηρεάζει την φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού. Σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας, οι Mangmang et al. (2015) μελέτησαν την επίδραση του *Azospirillum brasilense* σε βασιλικό, οι Geisenhoff et al. (2016) αξιολόγησαν την επίδραση δύο διαφορετικών υποστρωμάτων στο μαρούλι και οι Beauchamp et al. (2018) προσδιόρισαν την ανεκτικότητα του μαρουλιού σε διάφορα επίπεδα αλατότητας.

Ο όρος αλατότητα αναφέρεται στην ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων, κατά κανόνα Na^+ και Cl^- , κυρίως στο περιβάλλον της ρίζας και προκαλεί αλλοίωση των χαρακτηριστικών και πτώση του δυναμικού του νερού του εδάφους με αποτέλεσμα την έλλειψη νερού και ιοντικές διαταραχές στα φυτικά κύτταρα. Η αλατότητα ως παράγοντας καταπόνησης, παρουσιάζεται σε εκτεταμένες περιοχές του πλανήτη, οι οποίες για διαφορετικούς λόγους εμφανίζουν υψηλή αλατότητα στο έδαφος με αποτέλεσμα αυτή να επιφέρει υποβάθμιση του εδάφους, ιοντική καταπόνηση και τοξικότητα στους φυτικούς οργανισμούς (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

1.6 Ενυδρειοπονία με υφάλμυρο νερό

Τα συστήματα ενυδρειοπονίας γλυκού νερού αποτελούν την συνηθέστερη και πιο διαδεδομένη μορφή εφαρμογής. Σχετικά πρόσφατα, γίνονται προσπάθειες για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής και σε υφάλμυρο νερό κυρίως λόγω της περιορισμένης διάθεσης το γλυκού νερού στην αγροτική παραγωγή (Turcios and Papenbrock, 2014). Τα τελευταία χρόνια διεξάγονται πειράματα και μελέτες για να δούμε κατά πόσο συγκεκριμένα είδη φυτών μπορούν να αντέξουν σε συγκεκριμένες συνθήκες αλατότητας και πως αυτές οι συνθήκες καταπόνησης επηρεάζουν την ανάπτυξη τους.

Στην ενυδρειοπονία με υφάλμυρο νερό συνήθως επιλέγονται φυτά τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν σε συνθήκες αλατότητας με συγκεντρώσεις τουλάχιστον 5g/L. Αυτά τα φυτά χαρακτηρίζονται ως αλόφυτα (Ayers & Wescott 1989).

Για τα συγκεκριμένα φυτά οι ιδανικές συνθήκες ανάπτυξής τους θεωρείται το 1/3 ή το 1/2 της αλατότητας της θάλασσας, δηλαδή περίπου 10 με 20g/L καθώς η αλατότητα της θάλασσας υπολογίζεται περίπου στα 30 με 35g/L ανάλογα και το γεωγραφικό πλάτος.

Ένα από τα είδη που καλλιεργείται σε αυτές τις συνθήκες και ανήκει στην παραπάνω κατηγορία φυτών είναι και το κρίταμο (*Chritimum maritimum*). Τα αλόφυτα έχουν επιλέξει συγκεκριμένη στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος της αυξημένης αλατότητας με προσαρμογή βιοχημικών χαρακτηριστικών ώστε να τα προστατεύουν (π.χ. προλίνη) ή μορφολογικών χαρακτήρων όπως οι αλατώδεις αδένες των φύλλων. Στην τελευταία περίπτωση γίνεται μεταφορά του αλατιού από την ρίζα προς το υπέργειο τμήμα του φυτού, όπου και απεκκρίνεται με την μορφή κρυστάλλων από τους αλατώδεις αδένες που βρίσκονται στα φύλλα.

Τα είδη των ψαριών που μπορεί να εκτραφούν σε συστήματα ενυδραιοπονίας με υφάλμυρο νερό είναι η τσιπούρα (*Sparus aurata*) και το λαυράκι (*Dicentrarchus labrax*), διότι είναι ευρύαλα ψάρια, δηλαδή μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα μεγάλο εύρος αλατότητας. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή της ενυδραιοπονίας σε υφάλμυρο νερό παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον κυρίως λόγω των πλεονεκτημάτων τα οποία εμφανίζει όπως η μειωμένη χρήση γλυκού νερού, το ελεγχόμενο περιβάλλον στο οποίο γίνεται η καλλιέργεια, η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων μειώνοντας έτσι την ρύπανση του περιβάλλοντος, αλλά και η εντατικοποίηση της παραγωγής (Boxman et al. 2015, Pantanella & Colla 2013).

1.7 Σκοπός της εργασίας

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω μελέτες φαίνεται η αναγκαιότητα να εξετάσουμε περαιτέρω την επίδραση του υφάλμυρου νερού και των διαφορετικών αλατότητων στην ανάπτυξη του κρίταμου σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας. Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εκτίμηση της ανάπτυξης και φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φυτών του κρίταμου σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας με υφάλμυρο νερό τριών επιπέδων αλατότητας και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βάση των μετρήσεων που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Για αυτό και διεξήχθη πείραμα στο εργαστήριο ενυδραιοπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με ταυτόχρονη καλλιέργεια κρίταμου με λαυράκι.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματικές Συνθήκες

Το πείραμα έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στο ΤΟΛ ενυδραιοπονίας του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος από τις 27/11/18 και για σύνολο 65 ημερών, μέχρι και τις 30/1/19. Πριν την τοποθέτηση των φυτών του κρίταμου στα grow beds υπήρξε ένα διάστημα εγκλιματισμού των φυτών στα επίπεδα αλατότητας του πειράματος. Το διάστημα αυτό κράτησε ένα μήνα όπου τα φυτά ποτίζονταν με νερό διαφορετικής αλατότητας ανά τρεις με τέσσερις ημέρες, μέχρι να φτάσουν στην επιθυμητή τιμή αλατότητας, για να εγκλιματιστούν και να μην στρεσαριστούν. Ο διαχωρισμός των φυτών στην κάθε αλατότητα έγινε με την μέθοδο της τυχαιοποίησης την 7^η ημέρα εγκλιματισμού των φυτών, στις 14/11/18.

Χρησιμοποιήθηκαν εννιά ανεξάρτητα συστήματα ενυδραιοπονίας που το καθένα αποτελούνταν από δεξαμενή ψαριών, κλίνη φυτών, βιολογικό φίλτρο, μηχανικό φίλτρο και τις αντίστοιχες σωληνώσεις. Τα φυτά κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις μεταχειρίσεις (treatments) διαφορετικής τιμής αλατότητας, 14, 23 και 32 dS m⁻¹. Κάθε μεταχείριση είχε τρεις επαναλήψεις (x3 replicates). Για το συγκεκριμένο πείραμα μάρτυρας (control) ήταν τα φυτά του κρίταμου από την μεταχείριση με τιμή αλατότητας 14 dS m⁻¹.

Σε κάθε σύστημα τοποθετήθηκαν 6 φυτά, δηλαδή 18 φυτά ανά αλατότητα. Σύνολο για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 54 φυτά κρίταμου, τα οποία μοιράστηκαν στα 9 grow beds με την μέθοδο της τυχαιοποίησης. Σε κάθε δεξαμενή του ενυδραιοπονικού συστήματος βρίσκονταν 15 λαυράκια.

2.2 Συστήματα Ενυδραιοπονίας

Κάθε αυτόνομο ενυδραιοπονικό σύστημα αποτελούνταν από ένα ενυδρείο εκτροφής ψαριών (fish tank) με διαστάσεις 30 cm x 60 cm x 30 cm και όγκου 54 L, ένα grow bed με διαστάσεις 30 cm x 60 cm x 30 cm και όγκου 54 L και καλλιεργητική επιφάνεια 0.18 m².

Τα εννέα αυτόνομα ενυδρειοπονικά συστήματα τοποθετήθηκαν σε μεταλλικό πάγκο δυο επιπέδων. Η τοποθέτηση του grow bed έγινε στο δεύτερο επίπεδο του πάγκου ενώ στο πρώτο επίπεδο τοποθετήθηκαν τα ενυδρεία εκτροφής των ψαριών.

Η λειτουργία του κάθε ενυδρειοπονικού συστήματος υποστηρίζονταν από βιολογικό φίλτρο τύπου sumpr διαστάσεων 34 x 26 x 35 cm και συνολικού όγκου 30,94 L. Τα βιολογικά φίλτρα τοποθετήθηκαν σε διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 5mm στο δάπεδο. Το πρώτο τμήμα ήταν το μηχανικό φίλτρο το οποίο αποτελούνταν από πλεκτό καλάθι με άνοιγμα ματιού 10-25 mm στο οποίο τοποθετήθηκαν δύο στρώσεις από υαλοβάκα προκειμένου να σχηματιστεί ένα παχύ στρώμα κατακράτησης των υπολειμμάτων τροφής και περιττωμάτων των ψαριών δημιουργώντας μια επιφάνεια 214,5 cm². Το βιολογικό φίλτρο καταλάμβανε το μεγαλύτερο μέρος του φίλτρου δημιουργώντας επιφάνεια 455 cm².

Το υλικό πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου αποτελούνταν από μείγμα 4 L βιόσφαιρες, 2 L μακαρόνι και 2 L βιολογικό υλικό (μπίλιες) ούτως ώστε να αυξάνει η ειδική επιφάνεια του φίλτρου και ο όγκος του φίλτρου ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου αλλά για την καλύτερη δυνατή ανάπτυξη των βακτηρίων.

Στο τελευταίο τμήμα του φίλτρου τοποθετήθηκε η αντλία προκειμένου να στέλνει το νερό κατά 90% στο grow bed των φυτών και κατά 10% στο ενυδρείο των ψαριών δημιουργώντας μια επιφάνεια 214,5 cm². Επίσης σε κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα και στο επάνω μέρος τοποθετήθηκαν ειδικοί λαμπτήρες έντασης 400 Watt προκειμένου να εξασφαλισθεί η ημερήσια έκθεση των φυτών στο φως.

Η ένταση του φωτός ελέγχθηκε με μετρητή φωτεινής ακτινοβολίας στην φωτοσυνθετικά ενεργή περιοχή του φάσματος (Skye έτσι ώστε να υπάρχει παρόμοια ακτινοβολία σε όλα τα φυτά, όλων των συστημάτων. Η φωτοπερίοδος ρυθμίστηκε με χρονοδιακόπτη να είναι σε ώρες φως 9-30:14-30 ώρες σκοτάδι. Σε κάθε grow bed τα φυτά τοποθετήθηκαν σε ειδικά διάτρητα καλαθάκια (net pots) που περιείχαν άργιλο ως υπόστρωμα στήριξης.

Η παροχή του νερού στο σύστημα ήταν συνεχής δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό σταθερή παροχή 1496 cm³/min και ταχύτητα φιλτραρίσματος 2,24 cm/min και ήταν σταθερή σε όλα τα ενυδρειοπονικά. Η παροχή του αέρα στα πειραματικά ενυδρειοπονικά συστήματα γίνονταν μέσω μιας αεραντλίας η οποία διοχέτευε

ατμοσφαιρικό οξυγόνο διαμέσου μια πέτρας πωρόλιθου (αερόπετρας) διαστάσεων 12 x 25 mm, ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη διάχυση του αέρα στο νερό τόσο στη δεξαμενή ανάπτυξης των ψαριών όσο και στο grow bed των φυτών.



Εικόνα 1-2: Φυτά κρίταμου στο στάδιο του εγκλιματισμού τους



Εικόνα 3-4: Συστήματα ενυδρειοπονίας με ταυτόχρονη καλλιέργεια κρίταμου με λαυράκι.

2.3 Πειραματικό μέρος

Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε μετρήσεις φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo*, ανακλαστικότητας του φύλλου και συγκέντρωσης ολικών χλωροφυλλών.

Προκειμένου να προλάβουμε την εκδήλωση τροφοπενιών που θα πρόσθεταν έναν επιπλέον παράγοντα καταπόνησης στο πείραμα, προστέθηκαν σε όλα τα συστήματα χειλικός Fe-DTPA 7% και K_2SO_4 από 4 φορές (4/12/18, 28/12/18, 8/1/19, 19/1/19). Η παρασκευή διαλύματος και των δύο χημικών πραγματοποιήθηκε με νερό από το σύστημα με τις αντίστοιχες αλατότητες. Στην περίπτωση του Fe-DTPA η

συγκέντρωση του διαλύματος ήταν 1,24 g/l και κάθε σύστημα έλαβε 500ml αυτού, ενώ η συγκέντρωση του K_2SO_4 ήταν 29,13 g/l και κάθε σύστημα έλαβε 500ml αυτού.

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε επίσης 3 φορές στις 13/12/18, 10/1/19 και στις 23/1/19 σιφονισμό για την καθαριότητα των δεξαμενών των ψαριών καθώς και καθάρισμα των φυκών που σχηματιζόταν στην δεξαμενή των φυτών.

2.3.1 Μετρήσεις-Φθορισμός χλωροφύλλης a *in vivo*

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε 5 μετρήσεις φθορισμού της χλωροφύλλης. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με το όργανο Handy-PEA (Hansatech Instruments LTD, UK) το οποίο είναι ένα φασματοφωτόμετρο συνεχούς διέγερσης και αποτελείται από μία κεντρική μονάδα και μία κεφαλή με τρεις λαμπτήρες LED οι οποίοι προσαρμόζονται σε ειδικούς υποδοχείς-μανταλάκια. Για να πάρουμε την μέτρηση προσαρμόσαμε τον υποδοχέα στο φύλλο και στην συνέχεια στην κεφαλή του οργάνου. Απαραίτητη προϋπόθεση αυτής της μέτρησης ήταν ο φωτοσυνθετικός ιστός να μην δέχεται ακτινοβολία, για αυτό και τις μετρήσεις μας τις πήραμε τις πρώτες πρωινές ώρες πριν ανοίξουν τα φώτα στο εργαστήριο. Οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν από την μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης για να εξετάσουμε την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής των φυτών του κρίταμου είναι ο όρος F_v/F_m και ο όρος $P_{i_{total}}$, όπου

F_v/F_m : μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση και

$P_{i_{total}}$: δείκτης απόδοσης της μετατροπής ενέργειας από τα φωτόνια που απορροφώνται από τη φωτοσυλλεκτική κεραία του φωτοσυστήματος II έως την αναγωγή των τελικών αποδεκτών του φωτοσυστήματος I.

2.3.2 Μετρήσεις-Ανακλαστικότητα φύλλων

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε 5 μετρήσεις ανακλαστικότητας στις 12/12, 22/12, 7/1, 19/1 και στις 29/1. Η μέτρηση της ανακλαστικότητας έγινε με φορητό φασματοραδιόμετρο (JAZ, Ocean Optics).

Το όργανο αποτελείται από την κεντρική μονάδα από την οποία δίνουμε τις εντολές για τις μετρήσεις και ένα υποδοχέα-μανταλάκι το οποίο συγκρατούσε το φύλλο για να πάρουμε την μέτρηση.

Η κάθε μέτρηση ανακλαστικότητας πραγματοποιούνταν δύο φορές μέσα στην ημέρα: μία το πρωί πριν ανοίξουν τα φώτα και μία το μεσημέρι αφού αυτά είχαν ανοίξει. Και οι δύο μετρήσεις αφορούσαν το ίδιο φύλλο.

Από την μέτρηση της ανακλαστικότητας οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν για να εξετάσουμε την ανάπτυξη των φυτών του κρίταμου είναι α) το PRI, Photochemical Reflectance Index, Δείκτης φωτοσυνθετικής απόδοσης (Penuelas et al., 1995), β) το NDI Normalized Difference Index, Δείκτης συνολικής συγκέντρωσης χλωροφυλλών (Gitelson & Merzlyak, 1994) και το ΔPRI (μεσημέρι-πρωί), όπου

$$\text{PRI: } \frac{R531\text{nm} - R570\text{nm}}{R531\text{nm} + R570\text{nm}}$$

ΔPRI: PRI(μεσημέρι) - PRI(πρωί) (Κονάκ et al., 2018)

$$\text{NDI: } \frac{R750\text{nm} - R705\text{nm}}{R750\text{nm} + R705\text{nm}}$$

Όπου R=Ανακλαστικότητα φύλλου στο συγκεκριμένο μήκος κύματος.

2.3.3 Μετρήσεις-SPAD

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε 5 μετρήσεις με το όργανο SPAD (SPAD-502, Minolta), δηλαδή ένα φορητό χλωροφυλλόμετρο, όπου οι τιμές που εμφάνιζε το όργανο είναι αντίστοιχες της τιμής της χλωροφύλλης σε mg ανά m² στο φύλλο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 10/12, 22/12, 7/1, 19/1 και στις 29/1, σε ένα φύλλο ανά φυτό σε όλα τα φυτά των grow beds.

2.4 Τελική συλλογή

Στις 30/1/19 πραγματοποιήσαμε την τελική συλλογή των φυτών του κρίταμου από τα συστήματα ενυδρειοπονικής καλλιέργειας. Πριν την απομάκρυνση των φυτών

από το σύστημα έγινε καταγραφή των υποανάπτικτων-προβληματικών φυτών ανά αλατότητα ανά grow bed. Συγκεκριμένα ανά αλατότητα: Για 14 dS m^{-1} δεν καταγράφηκαν καχεκτικά ή υποανάπτικτα φυτά. Για 23 dS m^{-1} καταγράφηκαν 2 υποανάπτικτα ή καχεκτικά φυτά, συγκεκριμένα το ST4/5 και το ST8/4.

Για 32 dS m^{-1} καταγράφηκαν 4 υποανάπτικτα ή καχεκτικά φυτά, συγκεκριμένα το ST1/3, το ST5/5, το ST9/5 και το ST9/6.

Έπειτα κάναμε καταγραφή των φυτών που είχαν προσβληθεί από μία αφίδα του γένους *Planococcus* και συγκεκριμένα του είδους *Planococcus citri* που παρατηρήθηκε στα φυτά του κρίταμου μία εβδομάδα πριν την λήξη του πειράματος, χωρίς τα φυτά να έχουν υποστεί κάποια ζημιά από τα έντομα.

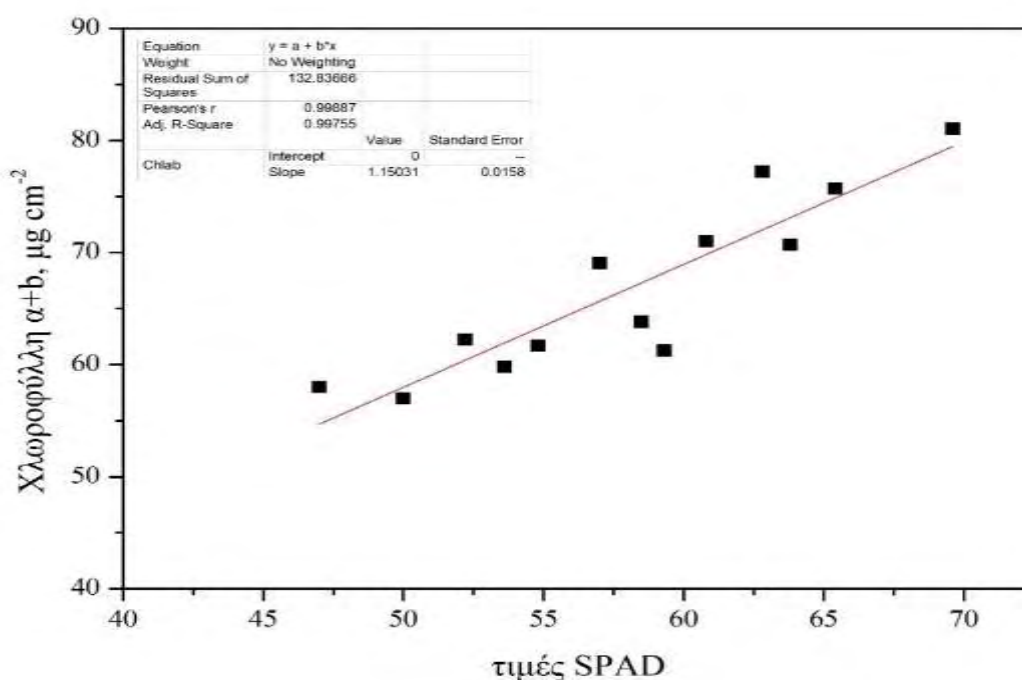
Συγκεκριμένα ανά αλατότητα: Για 14 dS m^{-1} καταγράφηκαν 2 φυτά με μικρή προσβολή κυρίως στα φύλλα και στον λαιμό, το ST6/1 και το ST7/2. Για 23 dS m^{-1} καταγράφηκαν 4 φυτά με μικρή προσβολή κυρίως στα φύλλα και την ρίζα, το ST2/4, το ST2/6, το ST4/4 και το ST4/5. Για 32 dS m^{-1} καταγράφηκαν 4 φυτά με μικρή προσβολή, κυρίως στα φύλλα, το ST1/3, το ST5/1, ST9/2 και το ST9/4.

Αφού λοιπόν τελειώσαμε με τις καταγραφές των υποανάπτικτων και προσβεβλημένων από την αφίδα φυτών ξεκινήσαμε με την συλλογή του κρίταμου από τα grow beds. Διαχωρίσαμε την ρίζα από το υπέργειο κομμάτι του κάθε φυτού. Ένα μέρος του υπέργειου (ακριβώς ζυγισμένο) τοποθετήθηκε σε φούρνο για αεροξήρανση για 3 μέρες στους 80°C . Αντίστοιχα στον φούρνο τοποθετήσαμε και τις ρίζες για αεροξήρανση για 3 μέρες στους 80°C . Στη συνέχεια καταγράψαμε το ξηρό βάρος ρίζας και υπέργειου.

2.5 Πρότυπη καμπύλη χλωροφυλλών

Για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χλωροφυλλών, η οποία είναι της μορφής $y=a+bx$, ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία. Στις 5/12/18 πραγματοποιήσαμε μέτρηση σε 14 φυτά κρίταμου, που είχαμε αφήσει στο θερμοκήπιο χωρίς να έχουν υποστεί κάποια καταπόνηση, με το όργανο SPAD (SPAD-502, Minolta Co LTD) και καταγράψαμε τις τιμές. Ακριβώς το ίδιο τμήμα του φύλλου με την συγκεκριμένη τιμή SPAD αφαιρέθηκε με έναν φελλοτρυπητήρα

νο1 (0,196 cm²) και μήκε στη διαδικασία εκχύλισης των φωτοσυνθετικών χρωστικών. Πραγματοποιήσαμε εκχύλιση με CaCO₃, διάλυμα ακετόνης 80% και άμμο. Έπειτα για κάθε ένα από τα 14 δείγματα-διαλύματα πραγματοποιήσαμε φυγοκέντριση για 10' με 4000 rpm/s. Στην συνέχεια κάναμε φωτομέτρηση με φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης (Shimatzu UV-1900) στα 470, 646, 663 και 720 nm. Τα 720 nm αποτελούν το σφάλμα και στην καμπύλη αφαιρούνται από τις άλλες τρεις τιμές για κάθε ένα από τα 14 φυτά αντίστοιχα. Τέλος, από τα αποτελέσματα της φωτομέτρησης και μετά την εφαρμογή των εξισώσεων Lichtenthaler and Wellburn (1983) και των απαραίτητων αναγωγών προέκυψαν οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών σε μg cm⁻² φύλλου. Το άθροισμα των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης a και b μήκε σε σύστημα αξόνων με τις αντίστοιχες τιμές SPAD προκειμένου να κατασκευαστεί η πρότυπη καμπύλη και να προκύψει η εξίσωση μετατροπής των τιμών SPAD σε πραγματικές συγκεντρώσεις χλωροφυλλών (Γράφημα 1).



Γράφημα 1: Πρότυπη καμπύλη συγκέντρωσης ολικών χλωροφυλλών (a+b) της μορφής $y=a+bx$. Η βέλτιστη ευθεία που περνά από την αρχή των αξόνων συσχετίζει τις τιμές SPAD με την συνολική συγκέντρωση χλωροφυλλών a+b σε μg cm⁻² σύμφωνα με τις παραμέτρους που εμφανίζονται στο ένθετο.

2.6 Στατιστική Ανάλυση

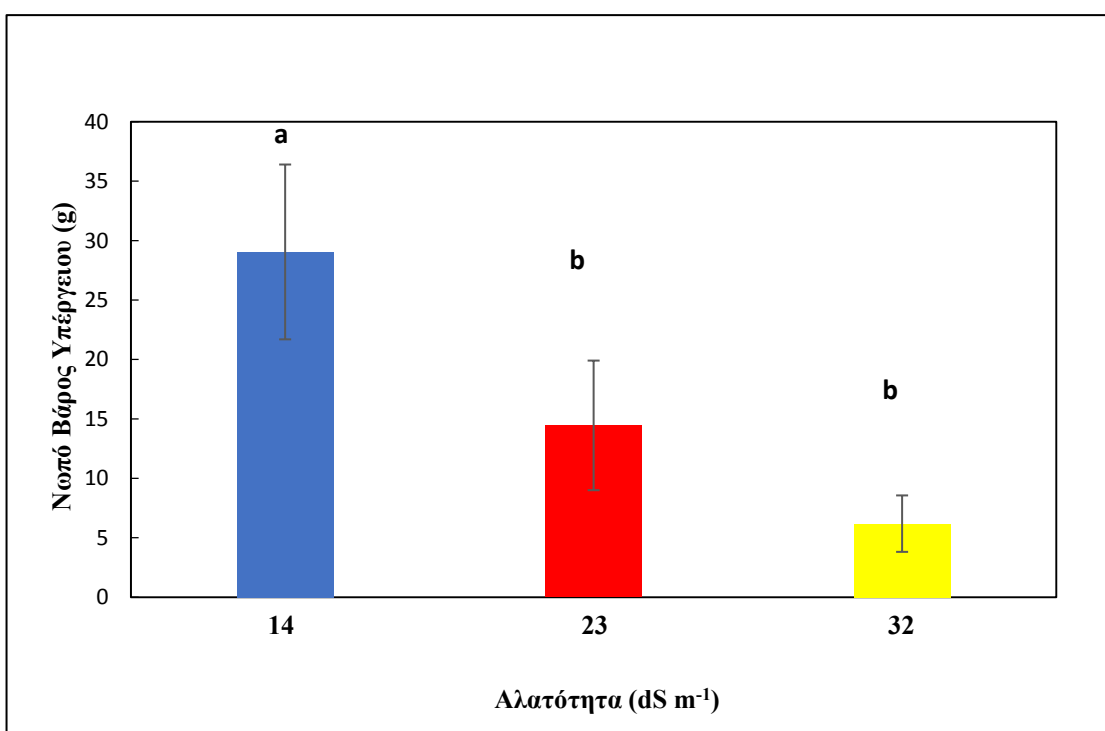
Για την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε την μονοπαραγωγική μέθοδο One-Way ANOVA και ακολούθως LSD Post-Hoc test (SPSS v.20, IBM Corp). Το επίπεδο σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων ανά ημερομηνία ορίστηκε στο $p < 0,05$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αναπτυξιακές Μετρήσεις

3.1.1 Νωπό Βάρος Υπέργειου

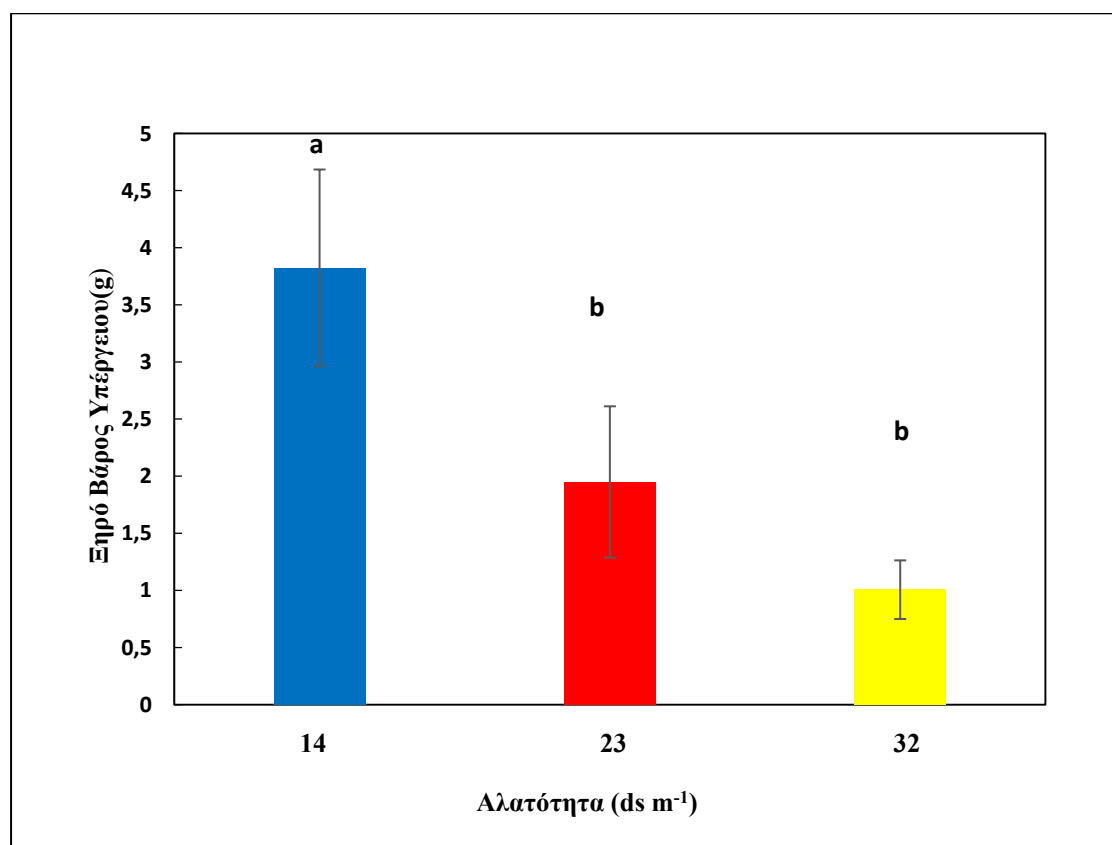
Στο γράφημα 2 απεικονίζεται το συνολικό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών του κρίταμου στις διάφορες μεταχειρίσεις. Μεγαλύτερη τιμή σε συνολικό βάρος υπέργειου τμήματος εμφάνισαν τα φυτά της μεταχείρισης με αλατότητα 14 dS m^{-1} . Οι μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m^{-1} δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Αντίθετα η μεταχείριση με αλατότητα 14 dS m^{-1} εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m^{-1} .



Γράφημα 2: Νωπό Βάρος υπέργειου τμήματος φυτών εκφρασμένο ως $M.O \pm SD$. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

3.1.2 Ξηρό Βάρος Υπέργειου

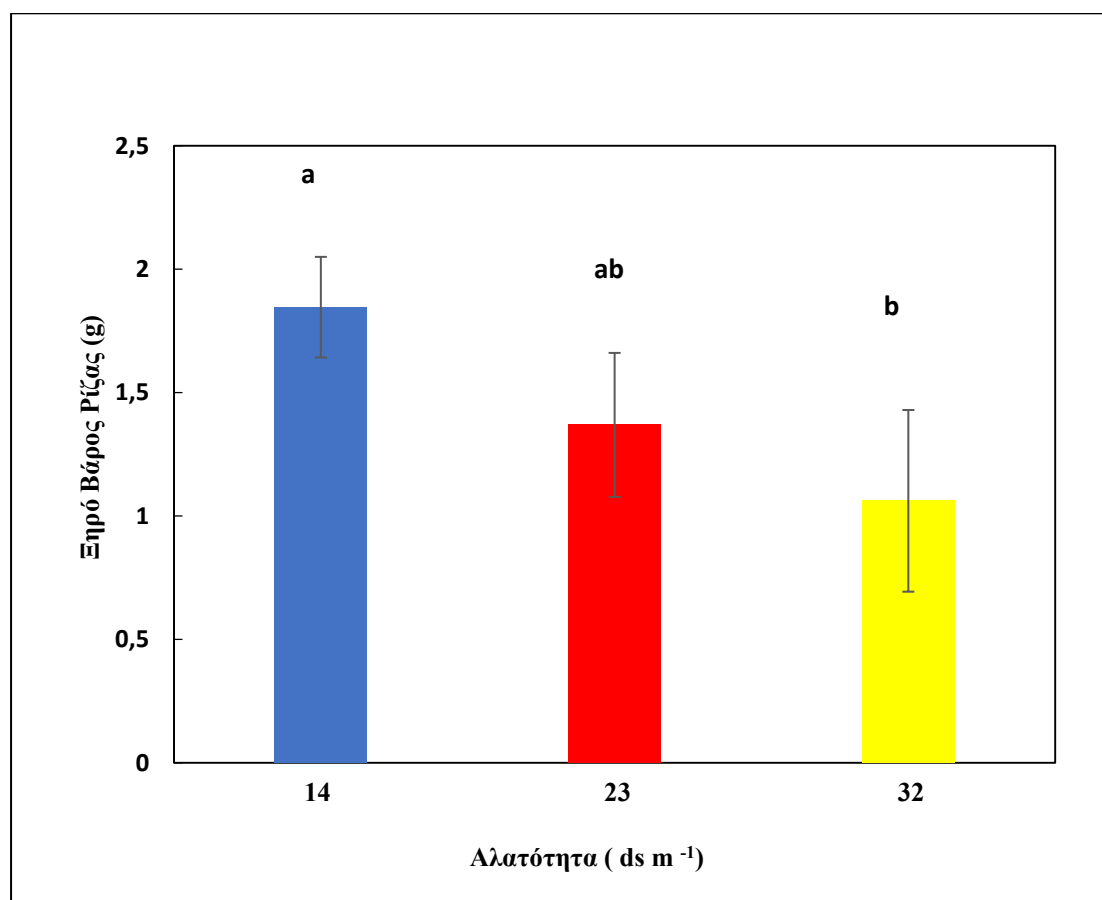
Στο γράφημα 3 απεικονίζεται το συνολικό ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού του κρίταμου ανά μεταχείριση. Μεγαλύτερη τιμή σε συνολικό ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος εμφάνισαν τα φυτά της μεταχείρισης 14 dS m^{-1} . Οι μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m^{-1} δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Αντίθετα η μεταχείριση με αλατότητα 14 dS m^{-1} εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m^{-1} .



Γράφημα 3: Ξηρό Βάρος υπέργειου τμήματος φυτών εκφρασμένο ως $M.O \pm SD$. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

3.1.3 Ξηρό Βάρος Ρίζας

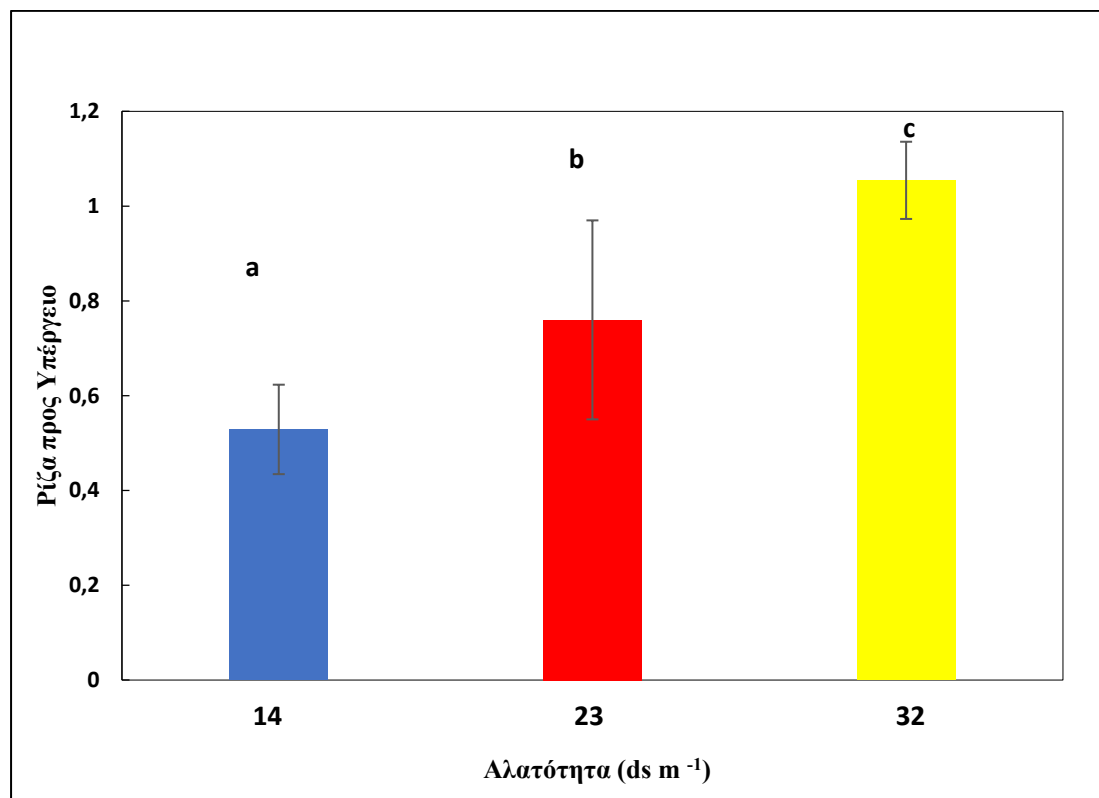
Στο γράφημα 4 απεικονίζεται το συνολικό ξηρό βάρος της ρίζας των φυτών του κρίταμου ανά μεταχείριση. Μεγαλύτερη τιμή στο συνολικό ξηρό βάρος της ρίζας εμφάνισαν τα φυτά της μεταχείρισης 14 dS m⁻¹. Η μεταχείριση 23 dS m⁻¹ δεν εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 14 και 32 dS m⁻¹. Αντίθετα οι μεταχειρίσεις με αλατότητα 14 και 32 dS m⁻¹ εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.



Γράφημα 4: Ξηρό Βάρος ρίζας φυτών εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

3.1.4 Αναλογία Ρίζας προς Υπέργειο

Στο γράφημα 5 απεικονίζεται η αναλογία ρίζας προς υπέργειο τμήμα των φυτών του κρίταμου ανά μεταχείριση. Την μεγαλύτερη τιμή στην αναλογία αυτή εμφάνισαν τα φυτά της μεταχείρισης 32 dS m⁻¹, ενώ όλες οι μεταχειρίσεις εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

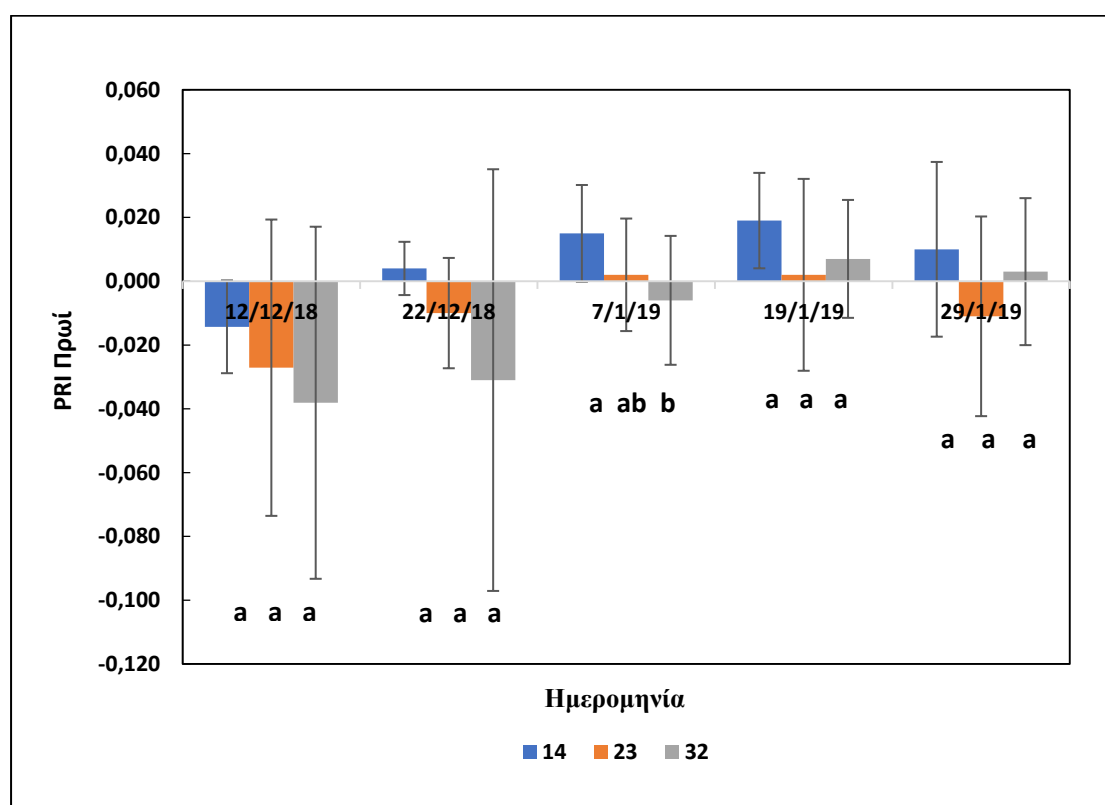


Γράφημα 5: Αναλογία ρίζας προς υπέργειου τμήματος φυτών εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

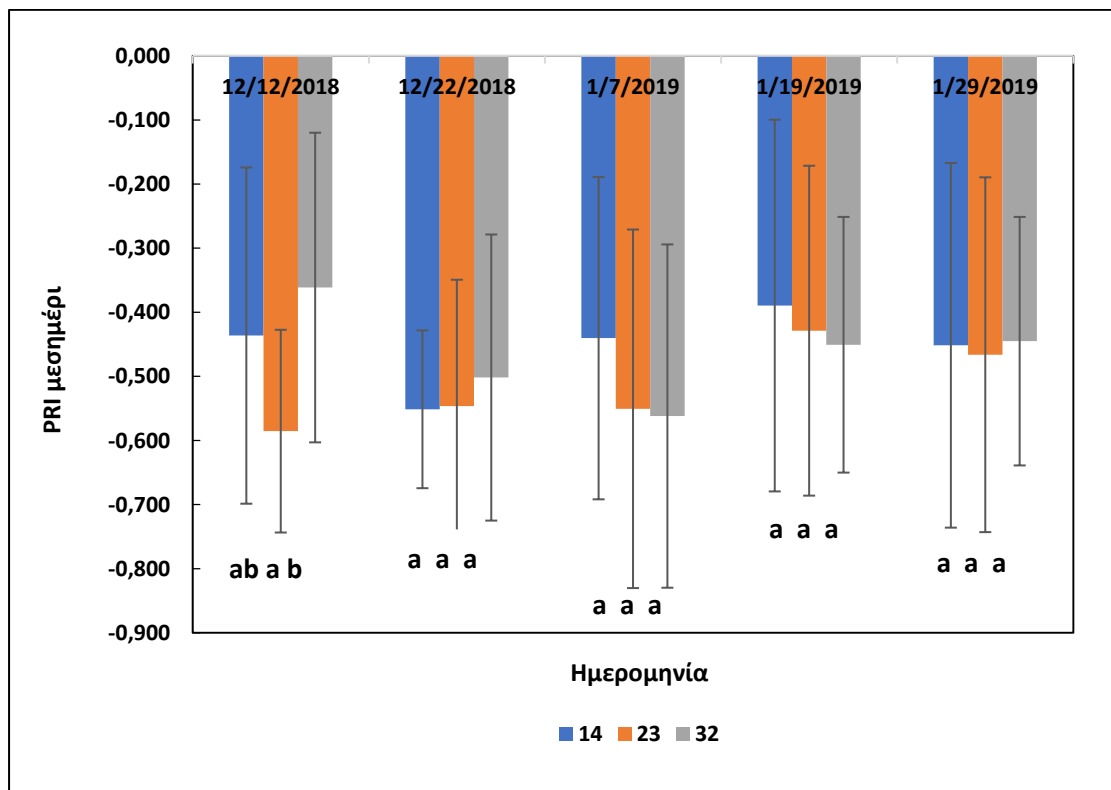
3.2 Ανακλαστικότητα

3.2.1 Δείκτης PRI

Στο γράφημα 6 απεικονίζεται ο δείκτης PRI, δείκτης φωτοσυνθετικής απόδοσης το πρωί, ενώ στο γράφημα 7 απεικονίζεται ο δείκτης PRI το μεσημέρι. Ο δείκτης PRI, στις μετρήσεις που πήραμε έδειξε υψηλότερες τιμές το πρωί πριν την φωτοσύνθεση σε σχέση με τις μετρήσεις που πήραμε το μεσημέρι στα φύλλα του κρίταμου. Οι μεσημεριανές μετρήσεις ήταν στο σύνολό τους αρνητικές. Πιο συγκεκριμένα για το γράφημα 5, στις 7/1/19, η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την μεταχείριση 32 dS m⁻¹, ενώ η μεταχείριση 23 dS m⁻¹ δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά. Στο γράφημα 6, στις 12/12/18, η μεταχείριση 23 dS m⁻¹ διαφέρει στατιστικά σημαντικά με την μεταχείριση 32 dS m⁻¹, ενώ η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις, ανά μεταχείριση, ανά ημερομηνία και στα δύο γραφήματα δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.



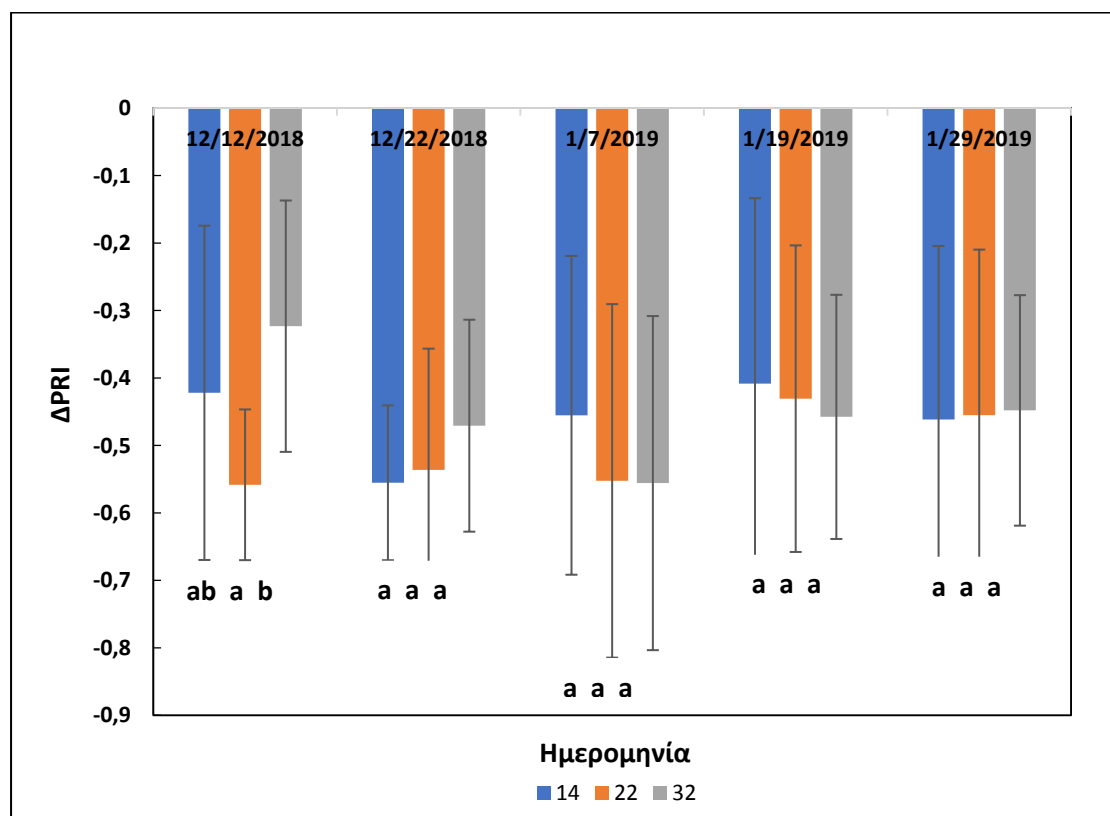
Γράφημα 6: Αποτελέσματα Δείκτη PRI πρωί πριν την έναρξη της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.



Γράφημα 7: Αποτελέσματα Δείκτη PRI μεσημέρι μετά την έναρξη της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

3.2.2 Δείκτης ΔPRI

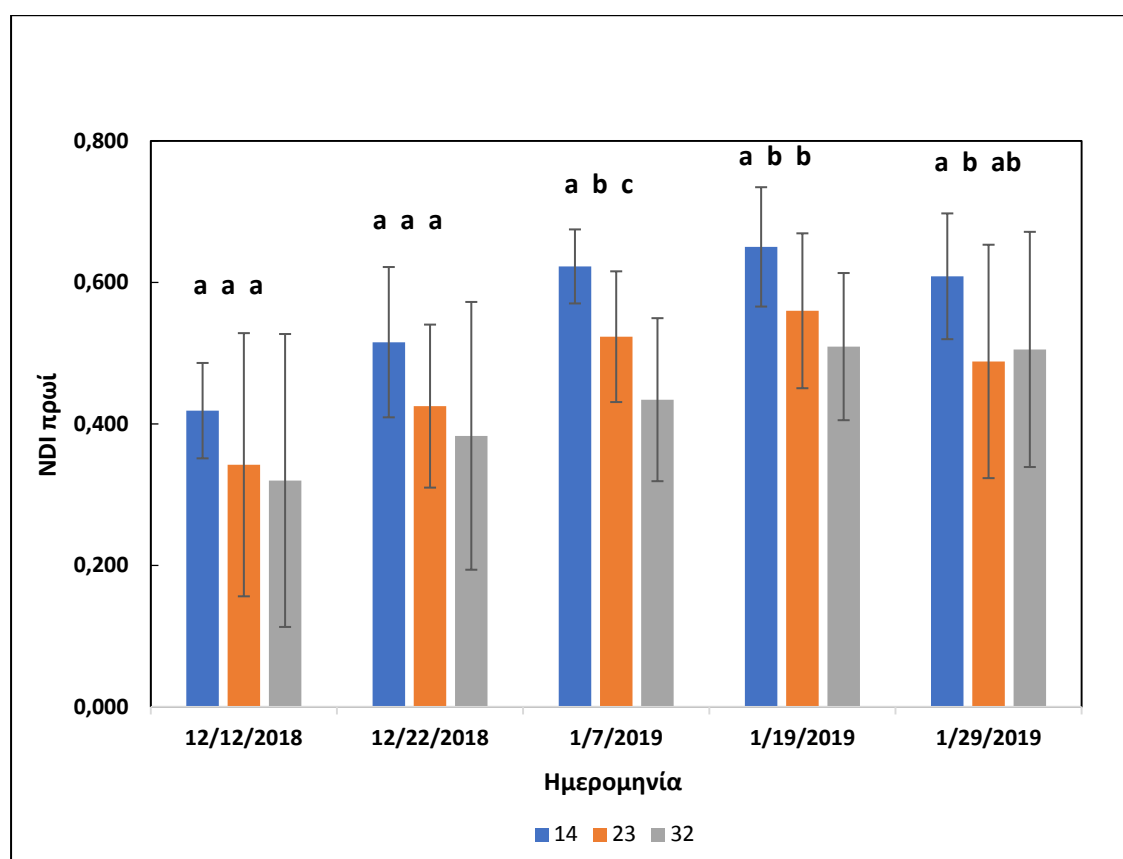
Στο γράφημα 8 απεικονίζεται ο Δείκτης ΔPRI. Ο Δείκτης ΔPRI προέρχεται από την διαφορά του PRI της μεσημεριανής μέτρησης από την πρωινή. Οι μετρήσεις του Δείκτη ΔPRI παρουσίασαν όλες αρνητικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, στις 12/12/18, η μεταχείριση 23 dS m⁻¹ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με την μεταχείριση 32 dS m⁻¹ αλλά όχι με την μεταχείριση 14 dS m⁻¹. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις, ανά ημερομηνία, ανά μεταχείριση δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.



Γράφημα 8: Αποτελέσματα Δείκτη ΔPRI σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες, σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο P< 0.05.

3.2.3 Δείκτης NDI

Στο γράφημα 9 απεικονίζεται ο Δείκτης NDI, δείκτης της συνολικής συγκέντρωσης χλωροφυλλών, ο οποίος φαίνεται να σταθεροποιείται μετά από την τρίτη μέτρηση στις 7/1/19. Πιο συγκεκριμένα, στις 7/1/19, όλες οι τιμές των μεταχειρίσεων μεταξύ τους διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Στις 19/1/19, η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m⁻¹, ενώ για τις 29/1/19, η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την μεταχείριση 23 dS m⁻¹. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις, ανά ημερομηνία και μεταχείριση δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

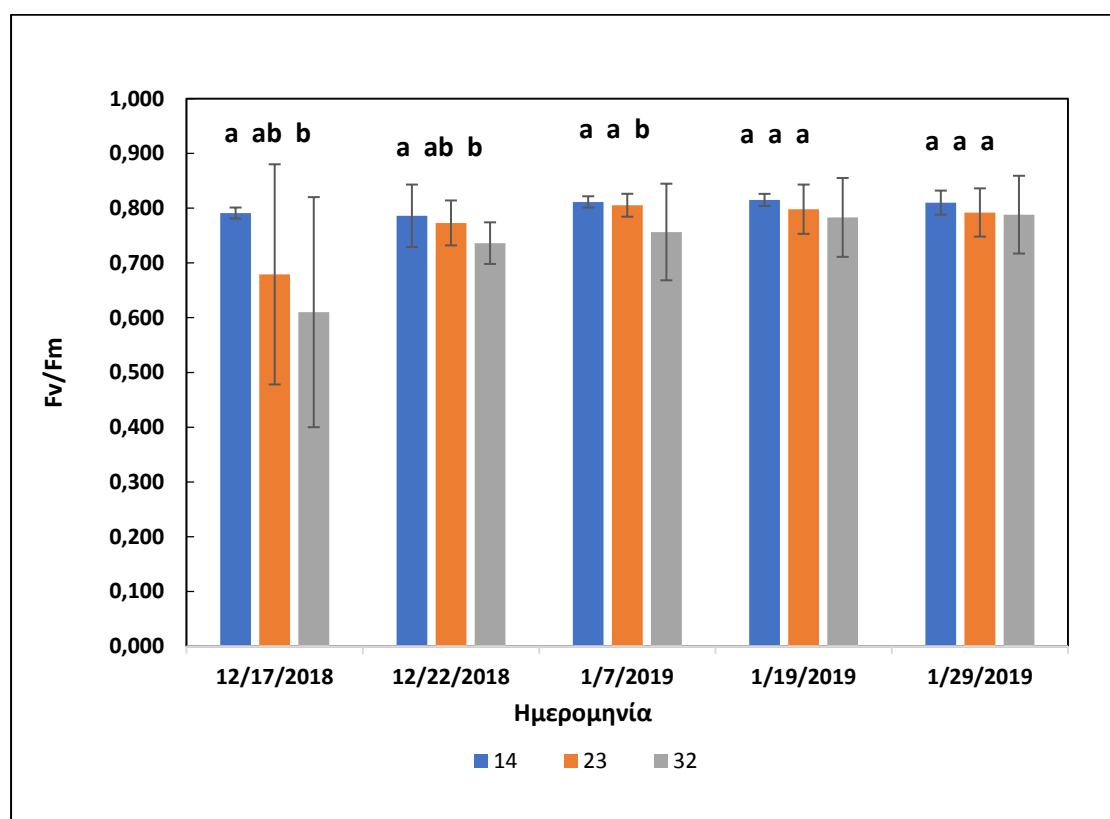


Γράφημα 9: Αποτελέσματα Δείκτη NDI σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες, σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο P< 0.05.

3.3 Φθορισμός

3.3.1 Fv/Fm

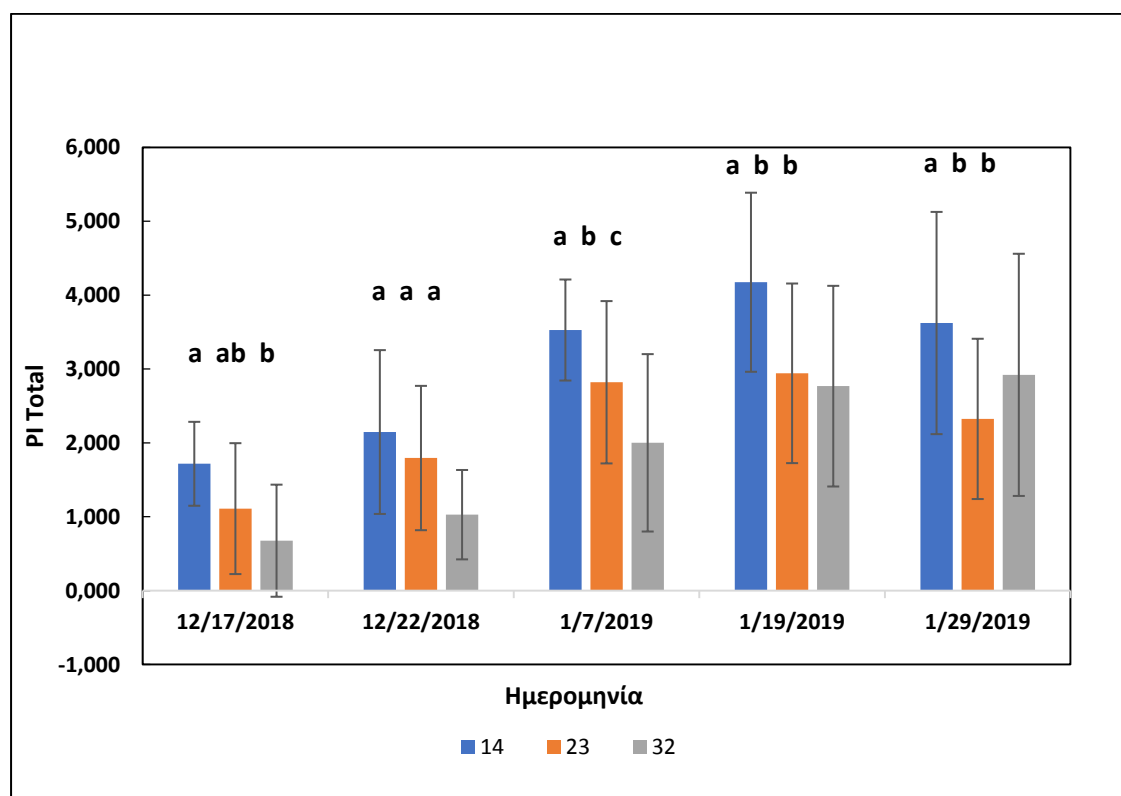
Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm μας υποδεικνύει την μέγιστη ανά φωτόνιο φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών του κρίταμου. Πιο συγκεκριμένα για το γράφημα 10, κατά την πρώτη μέτρηση στις 17/12/18, η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με την μεταχείριση 32 dS m⁻¹. Στις 22/12/18, κατά την δεύτερη μέτρηση, η μεταχείριση 14 dS m⁻¹ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με την μέτρηση 32 dS m⁻¹. Στις 7/1/19, κατά την τρίτη μέτρηση, η μεταχείριση 32 dS m⁻¹ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 14 και 22 dS m⁻¹. Στις δύο τελευταίες μετρήσεις που πήραμε, στις 19/1/19 και 29/1/19 οι τιμές φαίνεται να σταθεροποιούνται και δεν εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους σε επίπεδο μεταχειρίσεων.



Γράφημα 10: Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες, σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο p< 0.05.

3.3.2 Pi_{total}

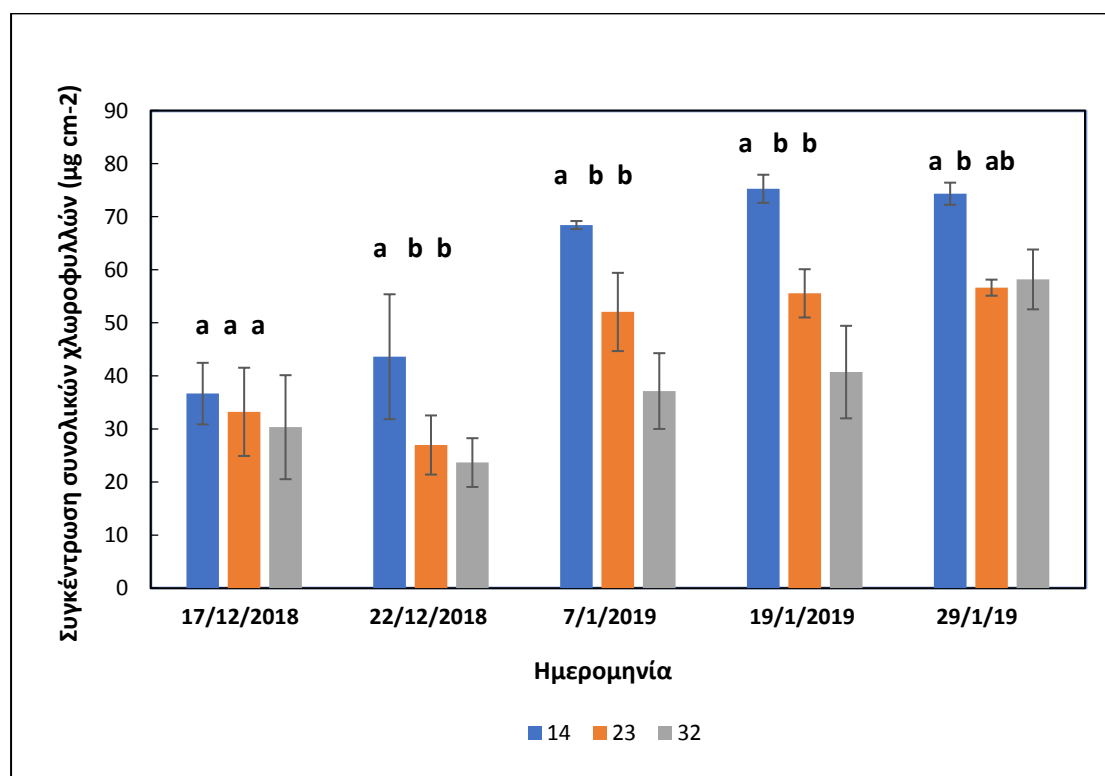
Η παράμετρος φθορισμού Pi_{total} , αποτελεί δείκτη απόδοσης της μετατροπής ενέργειας από τα φωτόνια που απορροφώνται από τη φωτοσυλλεκτική κεραία του φωτοσυστήματος II έως την αναγωγή των τελικών αποδεκτών του φωτοσυστήματος I και μπορεί να θεωρηθεί δείκτης της συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης. Πιο συγκεκριμένα για το γράφημα 11, οι τιμές του παράγοντα Pi_{total} παρουσίασαν αυξητικές τάσεις μέχρι και την τέταρτη μέτρηση στις 19/1/19 όπου ξεκίνησαν να σταθεροποιούνται. Στις 17/12/18 κατά την πρώτη μέτρηση που πραγματοποιήσαμε, η μεταχείριση 14 $dS\ m^{-1}$ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τη μεταχείριση 32 $dS\ m^{-1}$. Στις 7/1/19 κατά την τρίτη μέτρηση όλες οι μεταχειρίσεις μεταξύ τους παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, ενώ και στην τέταρτη και στην πέμπτη μέτρηση, η μεταχείριση 14 $dS\ m^{-1}$ παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 23 και 32 $dS\ m^{-1}$. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις, ανά ημερομηνία, ανά μεταχείριση δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.



Γράφημα 11: Η παράμετρος φθορισμού Pi_{total} σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες, σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως $M.O \pm SD$. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

3.4 Συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών

Βάση της πρότυπης καμπύλης χλωροφυλλών και της εξίσωσης που προέκυψε, $y=1,15x$, συσχετίσαμε τις τιμές SPAD με την πραγματική συνολική συγκέντρωση χλωροφυλλών στα φύλλα του κρίταμου. Πιο συγκεκριμένα για το γράφημα 12, η συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών παρουσίασε αυξητικές τάσεις μέχρι και την τελευταία μέτρηση στις 29/1/19, με την μεταχείριση 14 dS m^{-1} να φέρει τις μεγαλύτερες τιμές. Στις 22/12/18, όπως και στις 7/1/19, αλλά και στις 19/1/19, η μεταχείριση 14 dS m^{-1} παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις 23 και 32 dS m^{-1} . Στις 29/1/19 η μεταχείριση 14 dS m^{-1} παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με την μεταχείριση 23 dS m^{-1} . Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις, ανά ημερομηνία και μεταχείριση δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.



Γράφημα 12: Συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών (a+b) στα φυτά του κρίταμου σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες, σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις εκφρασμένο ως M.O±SD. Τα διαφορετικά γράμματα εκφράζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p < 0.05$.

4. Συζήτηση

4.1 Επίδραση της αυξημένης αλατότητας σε σύστημα ενυδρειοπονίας στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του κρίταμου

Στο ενυδρειοπονικό σύστημα που κατασκευάσαμε για τις ανάγκες του πειράματος εφαρμόσαμε τρεις διαφορετικές συνθήκες αλατότητας στα φυτά του κρίταμου, 14, 23 και 32 dS m⁻¹ όπου μετά το πέρας των 65 ημερών που διήρκησε το πείραμα τα παραλάβαμε για να καταγράψουμε τα αναπτυξιακά τους χαρακτηριστικά και πως αυτά επηρεάστηκαν από τις συνθήκες αλατότητας. Πιο συγκεκριμένα καταγράψαμε το συνολικό νωπό και ξηρό τους βάρος, το ξηρό βάρος της ρίζας και την αναλογία ρίζας προς το υπέργειο τμήμα του φυτού.

Συνολικά παρατηρήθηκε αύξηση της φυτικής βιομάζας των φυτών του κρίταμου από την ημέρα που τα τοποθετήσαμε στο ενυδρειοπονικό σύστημα μέχρι και την ημέρα που τα αφαιρέσαμε για να καταγράψουμε τα αναπτυξιακά τους χαρακτηριστικά. Η αύξηση αυτή, κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες καταπόνησης και συγκεκριμένα της αυξημένης αλατότητας, οφείλεται στο γεγονός ότι το κρίταμο ανήκει σε μία κατηγορία φυτών, γνωστών ως αλόφυτα. Τα αλόφυτα παρά τις υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων, οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες οσμωτικής και ιοντικής καταπόνησης στα φυτά, παρουσιάζουν μηχανισμούς ρύθμισης της αλατότητας. Μεταξύ αυτών είναι οι αλατώδεις αδένες που έχουν στα φύλλα και καταφέρνουν να απεκκρίνουν, σε μορφή κρυστάλλων, το αλάτι από το υπέργειο τμήμα τους (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Αυτή ήταν και η πρώτη παρατήρηση που καταγράψαμε σε κάθε φυτό που τοποθετήθηκε στο ενυδρειοπονικό σύστημα ανεξαρτήτως σε ποια από τις τρεις διαφορετικές συνθήκες αλατότητας αναπτύχθηκε.

Σε ότι αφορά το νωπό και το ξηρό βάρος των φυτών του κρίταμου παρατηρήσαμε διαφορές στα τελικά μας αποτελέσματα. Τα φυτά που τοποθετήθηκαν στις δεξαμενές με συνθήκες αλατότητας 14 dS m⁻¹ παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές και διέφεραν στατιστικά σημαντικά συγκριτικά με τα φυτά που τοποθετήθηκαν στις άλλες δύο συνθήκες αλατότητας. Σύμφωνα με τους Ben Hamed et al. (2004) οι οποίοι πραγματοποίησαν πείραμα με κρίταμο και παράγοντα καταπόνησης την αυξημένη αλατότητα σε διάφορα επίπεδα, η αλατότητα στο κρίταμο μπορεί να

επιφέρει, ανάλογα και την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων, τρία αποτελέσματα. Οσμωτική ανισορροπία, τοξικότητα των ιόντων στο φυτό και περιορισμό λήψης θρεπτικών. Όμως αυτή η οσμωτική ανισορροπία βρήκαν ότι δεν επηρέασε την μείωση της βιομάζας του κρίταμου στις μικρές συγκεντρώσεις αλατότητας. Η μείωση της φυλλικής επιφάνειας, άρα και της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, επηρεάστηκε στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αλατότητας, η οποία συνοδεύτηκε με την μείωση των φύλλων ανά φυτό, του συνολικού του βάρους, άρα και της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Σε αντίθεση με το πείραμα μας όπου παρουσιάστηκαν κιτρινισμένα φύλλα και μαρασμός, στο πείραμα των Ben Hammed et al. (2004) δεν παρουσιάστηκε κάτι τέτοιο. Τα φυτά που είχαμε τοποθετήσει στις δεξαμενές με συνθήκες αλατότητας 23 και 32 dS m⁻¹ δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά το νωπό και το ξηρό τους βάρος, αλλά παρουσίασαν κατά την διάρκεια του πειράματος κιτρίνισμα και σε κάποιες περιπτώσεις μάρανση και νέκρωση ορισμένων φύλλων. Το κιτρίνισμα και η νέκρωση παρουσιάστηκε πιο έντονα στα φυτά της αλατότητας 32 dS m⁻¹ και μπορεί να οφείλεται στην αυξημένη αλατότητα ή στην ανεπάρκεια θρεπτικών κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Θρεπτικά όπως το κάλιο, ο σίδηρος και το ασβέστιο βρίσκονται συνήθως σε ανεπάρκεια σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα και πρέπει να γίνεται χορήγησή τους (Goddek et al., 2015 Rakocy et al., 2004, 2006). Στο συγκεκριμένο πείραμα προσθέσαμε Fe σε μορφή DTPA 7% και K₂SO₄ με σκοπό να παρέχουμε στα φυτά, τα απαραίτητα θρεπτικά και να μείνουν σε καλή κατάσταση μέχρι και το τέλος του πειράματος μιας και χαμηλές συγκεντρώσεις K και Fe στο υδατικό διάλυμα μπορεί να προκαλέσουν μείωση της ανάπτυξης των βλαστών και των ριζών (Roosta et al, 2014). Παρά τις προσθήκες θρεπτικών τα φυτά μπορεί να μην μπορούσαν να τα προσλάβουν λόγω της αυξημένης αλατότητας καθώς αυτή μπορεί να προκαλέσει οσμωτική καταπόνηση, ιοντική τοξικότητα και περιορισμό της πρόσληψης θρεπτικών μέσω του νερού με αποτέλεσμα την μερική ή την ολική νέκρωση του φυτού (Niu et al, 1995). Όπως μπορούμε να δούμε και σε σχετική βιβλιογραφία τα ιόντα του Na⁺ και του Cl⁻ όταν βρεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να μπλοκάρουν την πρόσληψη των απαραίτητων θρεπτικών από τα φυτά, με αποτέλεσμα η ρίζα να μην μπορεί να μεταφέρει το απαραίτητο K⁺ και Ca²⁺ προς το υπέργειο τμήμα του φυτού και να μην αναπτύσσεται όπως θα έπρεπε αλλά και το υπέργειο τμήμα του φυτού να παρουσιάζει μειωμένη φυτική βιομάζα (Ben Hamed et al, 2004). Η παρούσα μελέτη δεν διερεύνησε περαιτέρω εάν οι παραπάνω επιδράσεις

της αυξημένης αλατότητας επηρέασαν τις βιοχημικές και μορφολογικές παραμέτρους στην περίπτωση του κρίταμου.

Παρ' όλες τις διαφορές όμως σε επίπεδο ναπού και ξηρού βάρους γεγονός ήταν ότι όλα τα φυτά από την αρχή του πειράματος παρουσίασαν αύξηση της φυτικής τους βιομάζας, διαφορετικής έκτασης αναλόγως με τη μεταχείριση.

Στο ξηρό βάρος της ρίζας των φυτών του κρίταμου όπως και στην αναλογία ρίζας προς υπέργειο τμήμα του φυτού παρατηρήσαμε διαφορές στα τελικά μας αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε σταδιακή μείωση της βιομάζας της ρίζας καθώς αυξανόταν το επίπεδο αλατότητας. Στατιστικά σημαντικές διαφορές εντούτοις υπήρξαν μόνο μεταξύ της μικρότερης και μεγαλύτερης αλατότητας, ενώ ενδιάμεσες αλλά μη σημαντικές διαφορές με αυτές παρουσίασαν τα φυτά στα 23 dS m⁻¹. Γενικά, στο σύνολο των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκε αύξηση του ριζικού συστήματος κατά την διάρκεια του πειράματος, σε διαφορετική έκταση αναλόγως με την μεταχείριση. Όσον αφορά την αναλογία ρίζας προς υπέργειο τμήμα φυτού, όλες οι μεταχειρίσεις μεταξύ τους εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζουν τα φυτά της μεταχείρισης 32 dS m⁻¹. Το αποτέλεσμα αυτό είναι μάλλον συνηθισμένο σε καταστάσεις καταπόνησης, ιδιαίτερα όταν υπάρχει οποιαδήποτε αιτία δυσκολία στην ρίζα να προσλάβει νερό και θρεπτικά (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

4.2 Επίδραση της αυξημένης αλατότητας σε σύστημα ενυδραιοπονίας στις βιοχημικές παραμέτρους του κρίταμου

Οι τεχνικές του φθορισμού και της ανακλαστικότητας έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για την μη καταστροφική παρακολούθηση και ανίχνευση πιθανών καταπονήσεων στα φυτά. Η βασικότερη παράμετρος φθορισμού και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη Fv/Fm περιγράφει τη μέγιστη ανά φωτόνιο φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II και σχετίζεται ευθέως με την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής (Gallé et al. 2007). Υψηλές σχετικά τιμές του δείκτη αυτού (0,85-0,75), υποδεικνύουν μία λειτουργική και σε καλή κατάσταση φωτοσυνθετική συσκευή, με υψηλή ικανότητα παραγωγής φωτοχημικού έργου. Εάν οι τιμές του δείκτη αυτού πέφτουν κάτω από 0,75 παραπέμπουν σε καταπόνηση. Η μείωση των τιμών Fv/Fm έχει συσχετιστεί με ανεπάρκεια θρεπτικών, όπως Fe (Roosta, 2014) και με διάφορες

αβιοτικές καταπονήσεις, όπως η αυξημένη αλατότητα (Gallé et al., 2007). Ο δείκτης Fv/Fm από την αρχή του πειράματος και μέχρι την τρίτη μας μέτρηση παρουσίασε αυξητικές τάσεις σε όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ έπειτα σταθεροποιήθηκε μέχρι και το τέλος του πειράματος μεταξύ των τιμών 0,75 και 0,85 γεγονός που μας δείχνει την ικανότητα της φωτοσυνθετικής συσκευής του κρίταμου να λειτουργεί απρόσκοπτα ακόμη και σε υψηλές συγκεντρώσεις αλατότητας. Τα φυτά του μάρτυρα φαίνεται ότι αντιμετώπισαν την μικρότερη καταπόνηση από τα φυτά των άλλων δύο μεταχειρίσεων λόγω του ότι οι τιμές του παράγοντα φθορισμού Fv/Fm παρέμειναν μεταξύ του 0,75 και του 0,85 καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Η δεύτερη παράμετρος φθορισμού που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή συμπερασμάτων ήταν η παράμετρος Pi_{total} η οποία θεωρείται δείκτης συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης. Ο δείκτης κατά τον πρώτο μήνα του πειράματος παρουσίασε αυξητικές τάσεις ενώ κατά το δεύτερο μήνα σταθεροποιήθηκε με σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Φαίνεται ότι το φυτό σταδιακά αποκαθιστούσε τη συνολική αποδοτικότητα της φωτοσυνθετικής ροής ηλεκτρονίων ξεπερνώντας από τα μέσα του πειράματος το αρχικό στρες της υψηλής συγκέντρωσης αλατότητας. Η μειωμένη φωτοσύνθεση και η αυξημένη αναπνοή καθώς αυξάνεται η αλατότητα είναι συνήθη ευρήματα στα σχετικά πειράματα (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

Οι δείκτες της *in vivo* ανακλαστικότητας NDI και PRI είναι χρήσιμοι για την εκτίμηση του περιεχομένου των φωτοσυνθετικών χρωστικών και της ανάγκης προστασίας της φωτοσυνθετικής συσκευής αντίστοιχα (Sims & Gamon, 2002). Ο δείκτης PRI το πρωί ήταν αρνητικός κατά την πρώτη μέτρηση, στη συνέχεια όμως φάνηκε ότι ο μάρτυρας του πειράματος άρχισε να ανακάμπτει εμφανίζοντας θετικές τιμές. Το σύνολο των τιμών του δείκτη PRI το μεσημέρι ήταν αρνητικές. Γενικότερα, μείωση του δείκτη PRI παραπέμπει σε ανάγκη προστασίας της φωτοσυνθετικής συσκευής και φανερώνει καταπόνηση (Sims & Gamon, 2002), γεγονός που αποτυπώθηκε στις αντίστοιχες μετρήσεις. Ο δείκτης NDI μας βοηθάει στο να εκτιμήσουμε τις συνολικές χλωροφύλλες μέσω ανακλαστικότητας και συγκεκριμένα για το κρίταμο φαίνεται οι τιμές να συμβαδίζουν με την συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών. Υψηλότερες τιμές του δείκτη NDI παρουσίασε η μεταχείριση με αλατότητα 14 dS m⁻¹, ενώ την χαμηλότερη η μεταχείριση με αλατότητα 32 dS m⁻¹

γεγονός που μας δείχνει ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις αλατότητας επηρεάζουν και την συγκέντρωση των χλωροφυλλών στα φυτά.

Η συνολική συγκέντρωση χλωροφυλλών στα φύλλα του κρίταμου παρουσίασε αυξητικές τάσεις κατά το πρώτο μήνα του πειράματος και σταθεροποιήθηκε στη συνέχεια, με εμφανείς και σημαντικά μειωμένες τιμές στα φυτά των δύο μεταχειρίσεων υψηλότερης αλατότητας σε σχέση με το μάρτυρα. Παρόμοια αποτελέσματα στη συγκέντρωση των χλωροφυλλών του κρίταμου κατέγραψε μία πρόσφατη εργασία, όπου η σημαντική μείωση των χλωροφυλλών άρχισε σε επίπεδα αλατότητας παρόμοια με το ενδιάμεσο δικό μας (23 dS m^{-1}) (Hamdani et al. 2017). Τόσο η συγκεκριμένη εργασία όσο και άλλες παρόμοιες για το κρίταμο αποδίδουν την επίδραση της αλατότητας στη συγκέντρωση των χλωροφυλλών και την ανάπτυξη σε πρωταρχική αρνητική επίδραση στην πρόσληψη θρεπτικών από την ρίζα, ιδιαίτερος για το K^+ και Ca^{2+} . Γενικότερα, όταν τα ιόντα του Na και του Cl βρεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις παρεμποδίζουν την ρίζα να προσλάβει ανόργανα θρεπτικά και μέταλλα για την ανάπτυξη του φυτού καθώς τα ανταγωνίζονται, προκαλώντας οσμωτική και ιοντική καταπόνηση στα φυτά. Έτσι τα φυτά αφού δεν προσλαμβάνουν τα απαραίτητα για αυτά θρεπτικά δεν αναπτύσσονται, μειώνεται η συνολική συγκέντρωση των φύλλων σε χλωροφύλλες και μπορεί να προκληθεί μαρασμός ή νέκρωση τμήματος ή και ολόκληρου του φυτού γεγονός που δεν παρατηρήσαμε καθόλου στα φυτά της αλατότητας 14 dS m^{-1} , παρατηρήσαμε κιτρίνισμα ελάχιστα έως καθόλου στα φυτά της αλατότητας 23 dS m^{-1} και σε κάποια φυτά της αλατότητας 32 dS m^{-1} παρατηρήσαμε κιτρίνισμα, μαρασμό, ακόμη και νέκρωση τμήματος του φυτού.

5. Συμπεράσματα

Τα φυτά κρίταμου που αναπτύχθηκαν σε ενυδρειοπονικό σύστημα καλλιέργειας υπό συνθήκες αυξημένης αλατότητας αποκρίθηκαν με μειώσεις της ανάπτυξης και αλλαγές στη φυσιολογία τους και πιο συγκεκριμένα:

- Τα αυξανόμενα επίπεδα αλατότητας προκάλεσαν αντίστοιχες και στατιστικώς σημαντικές μειώσεις στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών σε σχέση με το μάρτυρα (14dS m^{-1}) και πιο συγκεκριμένα στο νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου και το ξηρό βάρος της ρίζας.
- Οι παράμετροι φθορισμού, κυρίως το Pi_{total} και λιγότερο το Fv/Fm παρουσίασαν το εξής πρότυπο: κατά τον 1^ο μήνα του πειράματος οι τιμές τους παρέπεμπαν σε αυξημένη καταπόνηση της φωτοσυνθετικής συσκευής, η οποία όμως φάνηκε να ανακάμπτει στη συνέχεια και αυτό αποτυπώθηκε στους δύο παραπάνω δείκτες κατά τον 2^ο μήνα της αναπτυξιακής περιόδου. Οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν σημαντικές με την μέγιστη αλατότητα να εμφανίζει και τις μέγιστες μειώσεις, στατιστικά σημαντικές στην περίπτωση του Pi_{total} .
- Ο δείκτης ανακλαστικότητας PRI ενώ το μεσημέρι εμφάνισε σταθερά αρνητικές τιμές παραπέμποντας σε ανάγκη προστασίας της φωτοσυνθετικής συσκευής, λόγω και της παρουσίας του φωτός, κατά τις πρωινές μετρήσεις έδειξε μία ανάκαμψη η οποία μεγεθυνόταν κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου. Πρώτα φάνηκαν να ανακάμπτουν τα φυτά του μάρτυρα και να διατηρούνται σε καλά επίπεδα μέχρι το τέλος του πειράματος.
- Η παράμετρος ανακλαστικότητας NDI που παραπέμπει στα επίπεδα των ολικών χλωροφυλλών φάνηκε να ακολουθεί το αντίστοιχο πρότυπο με το Pi_{total} δηλαδή μία ανάκαμψη κατά το 2^ο μισό του πειράματος σε σχέση με τις αρχικές μετρήσεις. Αντίστοιχες ήταν και οι διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων με τον μάρτυρα να εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές.
- Ακριβώς το ίδιο πρότυπο με αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως ακολουθήθηκε από τη διακύμανση της συγκέντρωσης των ολικών χλωροφυλλών. Παρατηρήσαμε ότι όσο αυξανόταν η αλατότητα τόσο μειώνονταν η συγκέντρωση χλωροφυλλών στα φύλλα, ενώ καταγράφηκε μερικό κιτρίνισμα και μαρασμός ειδικά για τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε αλατότητα 32 dS m^{-1} .

Βιβλιογραφία

Ayers, R. S. and Wescott, D. W. Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper, 1989, vol. 29, pp. 737–746.

Beauchamp, W. R., Pickens, J. M., Sibley, J. L., Chappell, J. A., Martin, N. R., and Newby, A. F. (2018). Salt Level in a Simulated Aquaponic System and Effects on Bibb Lettuce. *International Journal of Vegetable Science* 24(2), 122-136.

Ben Hamed K., Debez A., Chibani F., & Abdelly C. (2004). Salt response of *Crithmum maritimum*, an oleagineous halophyte. *Tropical Ecology* 45(1): 151-159.

Boxman, S., Main, K., Nystrom, M., Ergas, S.J., Trotz, M. Aquaponic System Produces Red Drum, Saltwater Vegetable Species, *Global Aquaculture Advocate*, 2015, pp. 58-60.

Gallé, A., Haldimann, P., & Feller, U. (2007). Photosynthetic performance and water relations in young pubescent oak (*Quercus pubescens*) trees during drought stress and recovery. *New Phytologist*, 174(4), 799-810.

Geisenhoff, L. O., Jordan, R. A., Santos, R. C., Oliveira, F. C. D., and Gomes, E. P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Engenharia Agrícola* 36(2), 291-299.

Gitelson, A. and Merzlyak, M.N. (1994). Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *Journal of Plant Physiology* 143, 286-292.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., and Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7(4), 4199–4224

Hamdani F., Derridj A., Rogers H. (2017) Diverse salinity responses in *Crithmum maritimum* tissues at different salinities over time *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17 (3), 716-734

Kováč, D., Veselovská, P., Klem, K., Večeřová, K., Ač, A., Peñuelas, J., & Urban, O. (2018). Potential of Photochemical Reflectance Index for Indicating Photochemistry and Light Use Efficiency in Leaves of European Beech and Norway Spruce Trees. *Remote Sensing* 10, 1202.

Lichtenthaler H, Wellburn A. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochememical Society Transactions* 603: 591 – 592.

Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., and Thompson, R.E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435, 67-74.

Mangmang, J. S., Deaker, R., and Rogers, G. (2015). Inoculation effect of *Azospirillum brasilense* on basil grown under aquaponics production system. *Organic agriculture* 6(1), 65-74.

Niu, X., R.A. Bressan, P.M. Hasegawa & J.M. Pardo. 1995. Ion homeostasis in NaCl environments. *Plant Physiology* 109: 735-742.

Pantanella E., Colla G. Saline aquaponics opportunities for integrated marine aquaculture. International aquaponic conference: Aquaponics and global food security, 19-21 June 2013, University of Wisconsin-Stevens Point, 2013.

Penuelas, J., Filella, I., and Gamon, J. A. (1995). Assessment of photosynthetic radiation- use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist* 131(3), 291-296.

Rakocy, J.E., Masser, M.P., and Losordo, T.M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center 454, 1-16.

Rakocy, T. Shultz, C. Bailey, D and Thoman, E. (1989). Aquaponic Production of Tilapia and Basil: Comparing a Batch and Staggered Cropping System Agricultural Experiment Station University of the Virgin Islands.

Roosta, H.R. (2014). Comparison of the Vegetative Growth, Eco-Physiological Characteristics and Mineral Nutrient Content of Basil Plants in Different Irrigation Ratios of Hydroponic: Aquaponic Solutions. *Journal of Plant Nutrition* 37(11), 1782-1803.

Sims, D. A., and Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote sensing of environment*, 81(2-3), 337-354.

Turcios, A.E. and Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents—What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability* 6, 836-856.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., and Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *Hort Technology* 21(1), 6-13.

Walker R. L., Burns I. G., Moorby J. (2001) Responses of plant growth rate to nitrogen supply: a comparison of relative addition and N interruption treatments. *JExpBot*52(355):309-317.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Μουραντιάν Α., (2019). «Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρείοπονίας», Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης ΠΜΣ «Αειφόρος Αγροτική Παραγωγή και Διαχείριση Περιβάλλοντος», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.

Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ. & Νικολόπουλος Δ. (2012). Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών. Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

Κρίταμο-Το εναλλακτικό βότανο για το φαγητό
<https://www.cyprusalive.com/el/crithmum> (Πρόσβαση στις 25 Νοέμβρη 2019).