



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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Λειτουργικές αποκρίσεις φυτών που αναπτύσσονται
υπό συνθήκες ενυδραιοπονίας (aquaponics)**

Ευαγγελία Τσουμαλάκου

Βόλος, 2023



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Τίτλος διατριβής:

Λειτουργικές αποκρίσεις φυτών που αναπτύσσονται υπό συνθήκες ενυδρειοπονίας
(aquaponics)

Αγγλικός τίτλος:

Functional responses of plants grown in aquaponic systems

Ευαγγελία Τσουμαλάκου

«Υπότροφος του Ελληνικού Ιδρύματος Έρευνας και Καινοτομίας»

«Υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών»



ΕΛΙΔΕΚ
Ελληνικό Ίδρυμα
Έρευνας & Καινοτομίας

«Η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «Υποτροφίες ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. Υποψηφίων Διδασκτόρων» (Αριθμός Υποτροφίας: 528)».

«Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας».



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

1. Ευθυμία Λεβίζου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγή και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπουσα.
2. Νικόλαος Κατσούλας, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγή και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
3. Ελένη Μεντέ, Καθηγήτρια, Τμήμα Κτηνιατρικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μέλος.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Ευθυμία Λεβίζου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγή και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπουσα.
2. Νικόλαος Κατσούλας, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγή και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
3. Ελένη Μεντέ, Καθηγήτρια, Τμήμα Κτηνιατρικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μέλος.
4. Περσεφόνη Μαλέτσικα, Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγή και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
5. Αικατερίνη Καραμανώλη, Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μέλος.
6. Γεώργιος Λιακόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Μέλος.
7. Κωνσταντίνος Κορμάς, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.

Copyright © Ευαγγελία Τσουμαλάκου, 2023.

«Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα».

Ευαγγελία Τσουμαλάκου, 2023. Λειτουργικές αποκρίσεις φυτών που αναπτύσσονται υπό συνθήκες ενυδρειοπονίας (aquaponics).

Συνολικός αριθμός σελίδων της διατριβής: 229

Αριθμός πινάκων: 26

Αριθμός γραφημάτων: 29

Αριθμός εικόνων: 19

Αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών: 346

Στον Χρήστο και στον Τσάρλυ

&

*Στη μνήμη των παππούδων μου,
Ρήνας και Κώστα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η φύση της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής ήταν πολυσύνθετη, περιλάμβανε πολλά μονοπάτια και νιώθω πολύ τυχερή και ευγνώμων που είχα στο πλευρό μου άτομα που με βοήθησαν με όλη τους την καρδιά. Ένας κύκλος λοιπόν κλείνει και νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλα αυτά τα άτομα που βρέθηκαν στο δρόμο μου και συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, να υλοποιήσω την παρούσα διδακτορική διατριβή και να φτάσω στο όνειρο μου, στο στόχο μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα αυτής της διδακτορικής διατριβής, κα Έφη Λεβίζου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, για την ανάθεση του θέματος, και την ευκαιρία που μου έδωσε να προσπαθήσω να εξελιχθώ στην επιστήμη που αγαπώ και θέλω να προσφέρω. Σας ευχαριστώ ειλικρινά για την ατελείωτη βοήθεια ως προς την υλοποίηση των πειραμάτων, την συνεισφορά στο εργαστήριο Ενυδρειοπονίας, την γνώση που μου μεταδώσατε σε θεωρητικό, πρακτικό, εκπαιδευτικό και εργαστηριακό επίπεδο. Επίσης, θα ήθελα να σας ευχαριστήσω για την απλόχερη βοήθεια σας στην συγγραφή των επιστημονικών εργασιών αλλά και της διεξοδικής επιμέλειας της διδακτορικής διατριβής. Σας ευχαριστώ πολύ για την συνεργασία όλων αυτών των χρόνων, μου διδάξατε πάρα πολλά, δείξατε κατανόηση και με στηρίζατε σε κάθε μου βήμα. Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να σας ευχαριστήσω από καρδιάς και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο πρόσωπο σας για την αμέριστη προσφορά σας σε όλο αυτό το μακρύ ταξίδι της γνώσης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την συν επιβλέπουσα κα Ελένη Μεντέ, Καθηγήτρια, ΑΠΘ, για την βοήθεια της στον σχεδιασμό και υλοποίηση των πειραμάτων, στην συγγραφή επιστημονικών άρθρων και της διδακτορικής διατριβής. Κυρία Μεντέ, σας ευχαριστώ ειλικρινά, η συμβολή σας ήταν καθοριστική στην κατασκευή του εργαστηρίου Ενυδρειοπονίας του ΠΘ όπου και πραγματοποιήθηκαν όλα μου τα πειράματα καλλιέργειας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω εσάς και την υποψήφια διδάκτορα Στέλλα Ανδρεοπούλου για την παρασκευή των ιχθυοτροφών για το πείραμα του βασιλικού, καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Άννα Τάμπου για την μετάδοση των γνώσεων της στις αναλύσεις που διεξήχθησαν στο εργαστήριο Φυσιολογίας.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. Νίκο Κατσούλα, Καθηγητή, για την συνεισφορά του στις αναλύσεις θρέψης των φυτών με την μέθοδο ICP, για την καλή συνεργασία όλων των ετών και την συνεισφορά του στο εργαστήριο Ενυδρειοπονίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Δότη Παπαδημητρίου, ερευνήτρια, για την μετάδοση των γνώσεων της και την στήριξη, αλλά και την Μαρία Ασλανίδου, υποψήφια διδάκτορα του εργαστηρίου Γεωργικών

Κατασκευών, για την φιλοξενία σε εβδομαδιαία βάση και καλή συνεργασία για την περάτωση των αναλύσεων σχετικά με την ποιότητα των υδάτων.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Παναγιώτη Καψή για την δωρεά και κατασκευή των πρώτων συστημάτων ενυδρειοπονίας του εργαστηρίου όπου και πραγματοποιήθηκε η καλλιέργεια μαρουλιού.

Από καρδιάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νίκο Βλάχο, ΕΔΠ, για την κατασκευή των υπόλοιπων συστημάτων ενυδρειοπονίας στον εργαστηριακό χώρο και την παραχώρηση αυτών ώστε να υλοποιήσω τα υπόλοιπα τέσσερα πειράματα μου για τις καλλιέργειες σπανάκι, σταμναγκάθι, βασιλικό και μέντα. Κύριε Βλάχο θα ήθελα ακόμη να σας ευχαριστήσω για την προσφορά των πρώτων ιχθυδίων τιλάπιας, την εκπαίδευση και τη γνώση που μου μεταδώσατε στην εκτροφή ιχθύων και αναπαραγωγή της τιλάπιας για να μπορέσω να υλοποιήσω τα πειράματα μου, αλλά και για όλη την καθοδήγηση, στήριξη και εμπύχωση.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους κ. Παναγιώτη Βερίλλη, Αναπληρωτή Καθηγητή και κ. Κωνσταντίνο Κορμά, Καθηγητή, για την καθημερινή βοήθεια στο εργαστήριο Ενυδρειοπονίας, τις γνώσεις που μου μεταδώσατε, τη στήριξη όλων αυτών των ετών και την καλή συνεργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Αντωνιάδη, Καθηγητή, και τον διδάκτορα Γιώργο Θαλασσινό για την φιλοξενία τους στο εργαστήριο Εδαφολογίας, την καλή συνεργασία και την εκπαίδευση τόσο στον χειρισμό του φλογοφωτόμετρου όσο και στη μεθοδολογία των αναλύσεων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Λύκα, Αναπληρωτή Καθηγητή και την Μάρθα Καζή, υποψήφια διδάκτορα, για την φιλοξενία τους στο εργαστήριο Ανθοκομίας, και την εκπαίδευση στη διαδικασία απόσταξης αιθέριων ελαίων. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα Κατερίνα Καραμανώλη, Καθηγήτρια, και την υποψήφια διδάκτορα Κατερίνα Τριανταφύλλου για την φιλοξενία στο εργαστήριο Γεωργικής Χημείας, Τμήμα Γεωπονίας, ΑΠΘ για την βοήθεια τους στις αναλύσεις των αιθέριων ελαίων με την τεχνική GC-MS, καθώς και την συνεργάτιδά τους κα Αγγελική Αϊναλίδου για την εκπαίδευση, βοήθεια και καθοδήγηση της αναγνώρισης των ουσιών στα αιθέρια έλαια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Νίκο Τσιρόπουλο, Καθηγητή, και την κα. Άννα Καραγιάννη, ΕΤΕΠ, για την φιλοξενία και το ευχάριστο κλίμα στο εργαστήριο Χημείας όπου διεξήχθησαν οι αναλύσεις αντιοξειδωτικής ικανότητας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Περσεφόνη Μαλέτσικα, Επίκουρη Καθηγήτρια, για τις χρήσιμες συμβουλές της ως προς την μεθοδολογία της διαδικασίας, την καλή συνεργασία, την στήριξη και εμπύχωση.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Άρη Κυπαρίσση, Αναπληρωτή Καθηγητή, για τη διάθεση φορητών οργάνων και μετρητών που εγκαταστάθηκαν στο εργαστήριο Ενυδρειοπονίας, την βοήθεια ως προς τον χειρισμό τους, την συνεργασία και τις χρήσιμες συμβουλές στην επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων.

Ευχαριστώ πολύ τους κ. Ιωάννη Βαγγέλα, Επίκουρο Καθηγητή, και τον κ. Κωνσταντίνο Ζάρπα, ΕΔΠ, που ήταν πάντοτε διαθέσιμοι να βοηθήσουν σε οποιοδήποτε δυσκολία χρειάστηκε να αντιμετωπιστεί κατά τη διάρκεια των καλλιεργειών.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω προς τον διευθυντή του εργαστηρίου Ζιζανιολογίας κ. Ανέστη Καρκάνη, Αναπληρωτή Καθηγητή, και την κα. Λία Κουφοστάθη, ΕΔΠ, για όλη την συμπαράσταση, στήριξη, εμπύχωση και ευχάριστο κλίμα όλων αυτών των χρόνων. Σας ευχαριστώ πολύ, ειλικρινά.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ξανά όλα μέλη της επταμελούς επιτροπής Έφη Λεβίζου, Νικόλαο Κατσούλα, Ελένη Μεντέ, Περσεφόνη Μαλέτσικα, Αικατερίνη Καραμανώλη, Γεώργιο Λιακόπουλο και Κωνσταντίνο Κορμά για τον χρόνο που διαθέσατε κατά την μελέτη της παρούσας διδακτορικής διατριβής, τα σχόλια και τις διορθώσεις σας.

Οφείλω να ευχαριστήσω το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας ΕΛΙΔΕΚ, που χρηματοδότησε την παρούσα διδακτορική διατριβή με υποτροφία στο πλαίσιο της Δράσης: «2η Προκήρυξη Υποτροφιών ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για Υποψήφιους Διδάκτορες» για διάρκεια 28 μηνών. Επιπλέον, ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών ΙΚΥ για την χορήγηση υποτροφίας στα πλαίσια του προγράμματος «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας» για διάρκεια 16 μηνών.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους συνοδοιπόρους σε αυτό το ταξίδι, τις υποψήφιες διδακτόριδες, τα κορίτσια μου, Εύη Σταθοπούλου, Αναστασία Μουραντιάν, Βάσω Λιάβα, Έφη Μπατάκα και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές Κωνσταντίνα Παπαευσταθίου, Σωτήρη Σακοράφα και Ραφαηλία Γερμάνη. Σας ευχαριστώ που κάνατε τις στιγμές στο εργαστήριο μοναδικές και ευχάριστες, τις ώρες στο γραφείο πιο εύκολες, με εμπυχώνατε όταν έπεφτα και ήσασταν εκεί να βοηθήσετε με την καρδιά σας έμπρακτα με κάθε τρόπο, χωρίς αντάλλαγμα.

Πόσα ευχαριστώ να πω για τις φίλες μου Χριστίνα Κατσιούλα και Πέννυ Κίτσου είναι λίγα. Μας συντροφεύουν πολλά χρόνια φιλίας αλλά μέσα από το διδακτορικό δεθήκαμε ακόμη περισσότερο, μείνατε δίπλα μου και με στηρίξατε με την καρδιά σας. Σας ευχαριστώ ειλικρινά.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ και μια μεγάλη αγκαλιά για την οικογένεια μου, τα στηρίγματά μου, μαμά και μπαμπά τα καταφέραμε, παλέψαμε μαζί και αν περάσαμε δυσκολίες

ο ήλιος μας έλαμψε. Σας ευχαριστώ που είστε δίπλα μου κάθε λεπτό, που με στηρίζετε σε κάθε μου απόφαση και πιστεύετε σε μένα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και μια δεύτερη αγκαλιά στα υπόλοιπα μέλη της οικογένειας μου, Σίσσυ, Σωκράτη, Ίρις, Γιώργο, Σταύρο που ήσασταν δίπλα μου, με εμπνυχώνατε και μου δίνετε δύναμη να συνεχίσω. Μικρέ μου φίλε Τσάρλυ, σ' ευχαριστώ για την υπομονή σου, που περίμενες καρτερικά ώρες ατελείωτες να επιστρέψω στο σπίτι, που είσαι πάντα δίπλα μου και με αγαπάς χωρίς όριο.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον αφανή ήρωά μου, τον σύντροφο της ζωής μου, τον Χρήστο. Πόσα ευχαριστώ θέλω να σου πω... Όσα και να πω δεν φτάνουν. Ο δρόμος ήταν πολύ μακρύς αλλά άξιζε τον κόπο εφόσον τον περπατήσαμε και αυτόν μαζί. Μαζί γίναμε πιο δυνατοί, μαζί γελάσαμε, μαζί κλάψαμε, μαζί παλέψαμε. Όπως πάντα άλλωστε. Σ' ευχαριστώ που το υπόμεινες και αυτό μαζί μου, στάθηκες δίπλα μου βράχος και πίστεψες σε μένα πιο πολύ απ' ότι εγώ στον εαυτό μου. Σ' ευχαριστώ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	xvii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	xix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	xxi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xxvi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1. Ενυδραιοπονία, αρχή λειτουργίας και πλεονεκτήματα	11
3. Ιστορική ανασκόπηση και υφιστάμενη κατάσταση.....	14
4. Συζευγμένα και αποζευγμένα συστήματα ενυδραιοπονίας.....	15
5. Εκτροφή ψαριών σε κλειστά συστήματα.....	17
6. Βιολογικό και μηχανικό φίλτρο.....	19
7. Θρεπτικό διάλυμα.....	20
8. Μέθοδοι καλλιέργειας φυτών	23
8.1. Καλλιέργεια σε υπόστρωμα.....	24
8.2. Καλλιέργεια σε πλωτά συστήματα	25
8.3. Καλλιέργεια σε NFT.....	26
9. Είδη καλλιεργούμενων φυτών και εκτρεφόμενων ψαριών	26
10. Θρέψη φυτών και ενυδραιοπονία.....	28
11. Λειτουργικές αποκρίσεις φυτών	34
12. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΦΥΤΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ	38
1. Εισαγωγή	38
2. Καλλιέργεια μαρουλιού	42
2.1. Υλικά και μέθοδοι.....	42

2.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες	42
2.1.2. Συστήματα ενυδρείοπονίας.....	43
2.1.3. Θρεπτικό διάλυμα	44
2.1.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις	44
2.1.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών.....	45
2.1.6. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών.....	46
2.1.7. Φυσιολογικές παράμετροι και βιοχημικές αναλύσεις των φυτών	46
2.1.7.1. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών	46
2.1.7.2. PRI	47
2.1.7.3. Φθορισμός χλωροφύλλης α in vivo	47
2.1.7.4. Φωτοσύνθεση.....	48
2.1.7.5. Θρέψη φυτών	49
2.1.7.6. Αντιοξειδωτική ικανότητα.....	49
2.1.8. Στατιστική ανάλυση.....	50
2.2. Αποτελέσματα.....	50
2.2.1. Θρεπτικό διάλυμα	50
2.2.2. Ανάπτυξη ψαριών	51
2.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας μαρουλιού.....	52
2.3. Συζήτηση.....	59
2.4. Συμπεράσματα	66
3. Καλλιέργεια σπανακιού	68
3.1. Υλικά και μέθοδοι.....	68
3.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες	68
3.1.2. Συστήματα ενυδρείοπονίας.....	69
3.1.3. Θρεπτικό Διάλυμα	70
3.1.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις	70
3.1.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών.....	71

3.1.6. Ανάπτυξη φυτών, φυσιολογικές παράμετροι και βιοχημικές αναλύσεις των φυτών	72
3.1.6.1. Ανάπτυξη φυτών	72
3.1.6.2. Συνολική περιεκτικότητα σε chl	73
3.1.6.3. PRI	73
3.1.6.4. Φθορισμός chl a in vivo	73
3.1.6.5. Φωτοσύνθεση	73
3.1.6.6. Θρέψη φυτών	73
3.1.6.7. Αντιοξειδωτική ικανότητα	74
3.1.8. Στατιστική ανάλυση	74
3.2. Αποτελέσματα	74
3.2.1. Θρεπτικό διάλυμα	74
3.2.2. Ανάπτυξη ψαριών	76
3.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας σπανακιού	76
3.3. Συζήτηση	84
3.4. Συμπεράσματα	89
4. Καλλιέργεια σταμναγκαθιού	91
4.1. Υλικά και μέθοδοι	91
4.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες	91
4.1.2 Θρεπτικό διάλυμα	91
4.1.3. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις	91
4.1.4. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών	92
4.1.5. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών	93
4.1.6. Συνολική περιεκτικότητα σε chl	93
4.1.7. PRI	93
4.1.8. Φθορισμός της χλωροφύλλης a in vivo	94
4.1.9. Φωτοσύνθεση	94

4.1.10. Θρέψη φυτών	94
4.1.11. Αντιοξειδωτική ικανότητα	94
4.1.12. Στατιστική ανάλυση.....	94
4.2. Αποτελέσματα.....	95
4.2.1. Θρεπτικό διάλυμα	95
4.2.2. Ανάπτυξη ψαριών	96
4.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας σταμναγκαθιού	96
4.3. Συζήτηση.....	103
4.4. Συμπεράσματα	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΚΤΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΟΓΙΑΛΕΥΡΟΥ ΜΕ ΤΣΟΚΝΙΔΑ ΣΕ	
ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΚΗ ΕΚΤΡΟΦΗ ΚΟΚΚΙΝΗΣ ΤΙΛΑΠΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ	
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ	
	110
1. Εισαγωγή	110
2. Υλικά και μέθοδοι.....	113
2.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες	113
2.2. Παρασκευή σιτηρεσιών και αναλύσεις.....	113
2.2.1. Υγρασία και ξηρή ουσία	114
2.2.2. Ολικές αζωτούχες ενώσεις.....	115
2.2.3. Ολικά λιπίδια	115
2.2.4. Ολική ανόργανη ουσία.....	116
2.2.5 Ενέργεια	116
2.3. Θρεπτικό διάλυμα	116
2.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις.....	117
2.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών	117
2.6. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών.....	118
2.7. Φωτοσυνθετικές χρωστικές	118
2.8. PRI	119
2.9. Φθορισμός της χλωροφύλλης <i>a in vivo</i>	119

2.10. Φωτοσύνθεση.....	119
2.11. Θρέψη φυτών.....	119
2.12. Αντιοξειδωτική ικανότητα.....	120
2.13. Αιθέρια έλαια.....	120
2.14. Στατιστική ανάλυση.....	121
3. Αποτελέσματα.....	121
3.1. Θρεπτικό διάλυμα.....	121
3.2. Ανάπτυξη ψαριών.....	122
3.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας βασιλικού.....	123
4. Συζήτηση.....	132
5. Συμπεράσματα.....	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΚΤΡΟΦΗ ΚΟΚΚΙΝΗΣ ΤΙΛΑΠΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΙΚΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΣΙΤΙΣΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΝΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ.....	141
1. Εισαγωγή.....	141
2. Υλικά και μέθοδοι.....	144
2.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες.....	144
2.2. Θρεπτικό διάλυμα.....	144
2.3. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις.....	145
2.4. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών.....	146
2.5. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών.....	146
2.6. Φωτοσυνθετικές χρωστικές.....	146
2.7. PRI.....	147
2.8. Φθορισμός της χλωροφύλλης <i>a in vivo</i>	147
2.9. Ανταλλαγή αερίων και LCs.....	147
2.10. Θρέψη φυτών.....	147
2.11. Αντιοξειδωτική ικανότητα.....	148
2.12. Αιθέρια έλαια.....	148

2.13. Στατιστική ανάλυση.....	148
3. Αποτελέσματα.....	149
3.1. Θρεπτικό διάλυμα	149
3.2. Ανάπτυξη ψαριών	149
3.3. Αναπτυξιακές και λειτουργικές παράμετροι της μέντας	150
4. Συζήτηση.....	160
5. Συμπεράσματα	164
Βιβλιογραφία	166

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Συντομογραφίες	Αγγλική απόδοση	Ελληνική απόδοση
<i>a</i>	photosynthetic quantum yield	ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης
A_{max}	photosynthetic capacity	φωτοσυνθετική ικανότητα
A_n	photosynthetic rate	φωτοσυνθετικός ρυθμός
ATP	adenosine triphosphate	τριφωσφορική αδενοσίνη
B	boron	βόριο
Ca	calcium	ασβέστιο
CaO	calcium oxide	οξειδίο του ασβεστίου
car	carotenoids	καροτενοειδή
chl _a	chlorophyll a	χλωροφύλλη α
chl _b	chlorophyll b	χλωροφύλλη β
CO ₂	carbon dioxide	διοξειδίο του άνθρακα
Cu	copper	χαλκός
DO	dissolved oxygen	διαλυμένο οξυγόνο
DNA	deoxyribonucleic acid	δεσοξυριβονουκλεϊνικό οξύ
DPPH	2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl	2,2-διφαινυλ-1-πικρυλδραζυλ
DTPA	diethylenetriaminepentaacetic acid	διαιθυλενοτριαμινοπενταοξικό οξύ
DWC	deep water culture	καλλιέργεια με τεχνική επίπλευσης
E	transpiration rate	ρυθμός διαπνοής
EC	electrical conductivity	ηλεκτρική αγωγιμότητα
FAO	Food and Agriculture Organization	Διεθνής Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας
FCR	food conversion ratio	συντελεστής μετατρεψιμότητας τροφής
Fe	iron	σίδηρος
GC-MS	gas chromatography - mass spectrometry	αέρια χρωματογραφία - φασματομετρία μάζας
g_s	stomatal conductance	στοματική αγωγιμότητα
ICP-OES	inductively coupled plasma optical emission spectroscopy	φασματομετρία οπτικής εκπομπής επαγωγικού πλάσματος
K	potassium	κάλιο
K ₂ O	potassium oxide	οξειδίο του καλίου
K ₂ SO ₄	potassium sulphate	θεικό κάλιο
LCs	light respond curves	καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως
LHCs	light-harvesting complexes	φωτοσυλλεκτικά σύμπλοκα
LSM	leaf specific mass	ειδική μάζα φύλλων
LUE	light use efficiency	αποδοτικότητα χρήσης φωτός
MBBR	moving bed bioreactor	βιοαντιδραστήρες σε κινούμενες κλίνες
MBT	media bed technique	καλλιέργεια με τεχνική υποστρώματος
Mg	magnesium	μαγνήσιο
Mn	manganese	μαγγάνιο
Mo	molybdenum	μολυβδένιο
MS 222	tricaine methanesulfonate	μεθανοσουλφονική τρικαΐνη
N	nitrogen	άζωτο
Na	sodium	νάτριο
NaCl	sodium chloride	χλωριούχο νάτριο
NFT	nutrient film technique	καλλιέργεια με τεχνική λεπτού στρώματος θρεπτικού

NH ₃	ammonia	αμμωνία
NH ₄	ammonium	αμμώνιο
NO ₂ ⁻	nitrites	νιτρώδη
NO ₃ ⁻	nitrates	νιτρικά
NPQ	non photochemical quenching	μη φωτοχημική απόσβεσης περίσσειας ενέργειας
P	phosphorus	φώσφορος
PO ₄ ³⁻	phosphate	φωσφορικά
PPFD	photosynthetic photon flux density	πυκνότητα φωτοσυνθετικής φωτονιακής ροής
PQ	plastoquinone	πλαστοκινόνη
PRI	photochemical reflectance index	δείκτης φωτοχημικής ανακλαστικότητας
PSI	photosystem I	φωτοσύστημα I
PSII	photosystem II	φωτοσύστημα II
Q _A	quinone	κινόνη
RAS	recirculating aquaculture system	κλειστά συστήματα επανακυκλοφορίας νερού
Rd	dark respiration	ρυθμός της μιτοχονδριακής αναπνοής
RNA	ribonucleic acid	ριβονουκλεϊκό οξύ
ROS	reactive oxygen species	ενεργές μορφές οξυγόνου
Rubisco	ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase	ριβουλόζη-1,5-διφωσφορική καρβοξυλάση/οξυγενάση
SGR	specific growth rate	ειδικός ρυθμός αύξησης
S	sulphur	θείο
SO ₄ ²⁻	sulphate	θειικά
SSA	specific surface area	περιοχή ειδικής επιφάνειας
TAN	total nitrogen	ολικό άζωτο
WG	weight gain	αύξηση βάρους
WHO	World Health Organization	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
Zn	zinc	ψευδάργυρος
OHE	United Nations	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η χρήση του νερού κατά την διαδικασία παραγωγής προϊόντων ζωικής προέλευσης, όπως το βοδινό και το χοιρινό κρέας, τα πουλερικά και τα ψάρια σε κλειστά συστήματα ανακυκλοφορίας νερού. Κάθε σταγόνα στο σχήμα ισοδυναμεί με 500 λίτρα νερό. Τροποποιημένο σχήμα από (Joyce, et al., 2019).	11
Εικόνα 2. Σχηματική διάταξη ενός ενυδρειοπονικού συστήματος. Εμφανίζονται τα κύρια στοιχεία του και αναφέρεται ο ρόλος τους. Η διαδικασία ξεκινά με την είσοδο της τροφής στις δεξαμενές των ψαριών. Τα γαλάζια βέλη δείχνουν την ροή του νερού στο σύστημα. Τροποποιημένο σχήμα από (https://ag.purdue.edu/envision/the-big-idea-hydroponics-aquaponics/)	13
Εικόνα 3. Συστήματα ενυδρειοπονίας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας: (α) σε εσωτερικό χώρο εργαστηριακής κλίμακας καλλιέργεια μαρουλιού με την τεχνική υποστρώματος, (β) καλλιέργεια μέντας σε πλωτά συστήματα και (γ) πιλοτικό σύστημα με καλλιέργεια τομάτας σε θερμοκήπιο.....	15
Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση κάτοψης ενυδρειοπονικών συστημάτων (α) συζευγμένη ενυδρειοπονία όπου με μπλε χρωματισμούς παρουσιάζεται το σύστημα RAS (σε διάταξη από πάνω προς τα κάτω: δεξαμενές ψαριών, μηχανικό και βιολογικό φίλτρο) που τροφοδοτεί την υδροπονική καλλιέργεια (με πράσινο χρώμα) από όπου το νερό απορροής επιστρέφει στις δεξαμενές των ψαριών, (β) αποζευγμένη ενυδρειοπονία, όπου μετά το RAS σύστημα το θρεπτικό διάλυμα μεταφέρεται σε κεφαλή υδρολίπανσης για την συμπλήρωση θρεπτικών συστατικών και ρύθμιση του pH και έπειτα διοχετεύεται στην υδροπονική καλλιέργεια χωρίς την επιστροφή της απορροής (Monsees, et al., 2017).	17
Εικόνα 5. Παράδειγμα τυπικού διαγράμματος διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών σε διαφορετικές τιμές pH για εκτός εδάφους καλλιέργειες. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει ένα υδροπονικό σύστημα ενώ η μπλε γραμμή ένα σύστημα ενυδρειοπονίας. Τροποποιημένο σχήμα από (Lennard & Goddek, 2019).	22
Εικόνα 6. Καλλιέργεια ενυδρειοπονίας με τεχνική υποστρώματος σε θερμοκήπιο (https://ajayfibreglass.com.au/). Δεξιά, διάφορα υλικά υποστρώματος: (α) πετροβάμβακας, (β) διογκωμένη άργιλος (γ) περλίτης, και (δ) ίνες καρύδας (https://nosoilsolutions.com/).....	25
Εικόνα 7. Καλλιέργεια μαρουλιού σε πλωτά συστήματα (α) στο θερμοκήπιο (https://theaquaponicsource.com/) και (β) το ριζικό σύστημα των φυτών (https://gogreenaquaponics.com/).....	25

Εικόνα 8. Καλλιέργεια φυλλωδών λαχανικών με την μέθοδο NFT (α) στο θερμοκήπιο και (β) τοποθέτηση φυτών σε διάτρητα φυτοδοχεία. (https://foodrevolution.org/blog/hydroponics/).	26
Εικόνα 9. Είδη φυτών που έχουν καλλιεργηθεί σε διαφορετικούς τύπους συστημάτων ενυδρείοπονίας (Maucieri et al., 2018).	27
Εικόνα 10. Σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών συστατικών (α) επίδραση στο pH από την πρόσληψη θρεπτικών, (β) ανταγωνιστικές σχέσεις και (γ) συνεργατικές σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών συστατικών (Maucieri et al., 2019).	34
Εικόνα 11. Σχηματική όψη ενός συστήματος ενυδρείοπονίας σε εργαστηριακή κλίμακα, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Τα βέλη δείχνουν τη ροή του νερού μέσα στο σύστημα.	43
Εικόνα 12. Εκτροφή κόκκινης τιλάπιας στο εργαστήριο ενυδρείοπονίας για τις ανάγκες των πειραμάτων: (α) κόκκινη τιλάπια στο στάδιο της λάρβας σε ενυδρείο αναπαραγωγής, (β) προσέλευση ιχθυδίων για σίτιση κατά την πειραματική διαδικασία στα συστήματα ενυδρείοπονίας.	45
Εικόνα 13. Κάτοψη της κλίνης καλλιέργειας μαρουλιών των τριών μεταχειρίσεων πριν την συγκομιδή των φυτών στα ενυδρείοπονικά συστήματα (α) ομάδα Control, (β) ομάδα Fe, (γ) ομάδα Fe+K. Το μέγεθος κάθε καλλιεργητικής περιοχής ήταν 1m ²	52
Εικόνα 14. Σχηματική απεικόνιση πλάγιας όψης ενός αυτόνομου ενυδρείοπονικού συστήματος.	69
Εικόνα 15. Απεικόνιση των φυτών σπανακιού στα πλωτά συστήματα ενυδρείοπονίας την ημέρα 20 πριν την συγκομιδή της ομάδας Control (δεξιά) σε σύγκριση με την ομάδα Fe (κέντρο) και την ομάδα Fe+K (αριστερά).	78
Εικόνα 16. Ανάπτυξη φυτών σπανακιού υπέργειο και υπόγειο μέρος των φυτών την 45 ^η ημέρα του πειράματος και πριν την τελική συγκομιδή (α, β) ομάδα Fe+K, (γ, δ) ομάδα Fe.	78
Εικόνα 17. Καλλιέργεια σταμναγκαθιού σε πλωτά ενυδρείοπονικά συστήματα. Φωτογραφίες υπέργειων και υπόγειων τμημάτων πριν την συγκομιδή των φυτών (35 ^η ημέρα) για τις ομάδες (α, β) ομάδα Fe+K, (γ, δ) ομάδα Fe, (ε, στ) ομάδα Control.	97
Εικόνα 18. Καλλιέργεια βασιλικού σε πλωτά συστήματα ενυδρείοπονίας (α) πριν την 1 ^η κοπή των φυτών και (β) πριν την 2 ^η κοπή των φυτών.	124
Εικόνα 19. Καλλιέργεια μέντας σε πλωτά συστήματα ενυδρείοπονίας (α) πριν την 1 ^η κοπή των φυτών και (β) πριν την 2 ^η κοπή των φυτών.	152

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

- Γράφημα 1. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και οι αναλογίες τους κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). (α) chl_a, (β) chl_b, (γ) car, (δ) αναλογία chl a προς b, (ε) chl_s/car. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$) και η απουσία γραμμάτων στα (β) και (γ) υποδηλώνει απουσία σημαντικών διαφορών.....53
- Γράφημα 2. Τιμές PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στο μαρούλι (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=24$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).....54
- Γράφημα 3. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων των JIP-test που συνάγονται από τις καμπύλες OJIP φθορισμού chl a για το μαρούλι (Μέσοι όροι, $n=48$) για 6 πειραματικές ημέρες. (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 14, (γ) Ημέρα 21, (δ) Ημέρα 28, (ε) Ημέρα 35, (στ) Ημέρα 42. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν σύμφωνα με την μεταχείριση Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, όλες οι ενδείξεις αναφέρονται σε διαφορές του Control με τις άλλες δύο ομάδες (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές και ο αστερίσκος δείχνει διαφορές στο $p \leq 0,001$).55
- Γράφημα 4. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το μαρούλι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).56
- Γράφημα 5. Καμπύλες εξάρτησης φωτοσύνθεσης από το φως για το μαρούλι (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 21, (γ) Ημέρα 42 (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=8$). Στον πίνακα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι μέγιστοι φωτοσυνθετικοί ρυθμοί (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (α) και μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Τα διαφορετικά γράμματα ανά σειρά δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).....57
- Γράφημα 6. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων κατά την πειραματική περίοδο: (α) συγκέντρωση ολικών φαινολικών εκφρασμένων ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νωπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).58
- Γράφημα 7. Παράμετροι ανάπτυξης σπανακιού που καταγράφηκαν τις πειραματικές ημέρες 20 και 45 εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM ($n=15$). (α) Ξηρό βάρος φύλλων (β) LSM (γ)

Φυλλική επιφάνεια (δ) Διάμετρος ροζέτας. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$)..... 77

Γράφημα 8. Συγκεντρώσεις ολικής χλωροφύλλης και PRI που προέρχονται από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στο σπανάκι (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). (α) Chl a+b (β) PRI πρωί (γ) PRI μεσημέρι. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$)..... 79

Γράφημα 9. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων των JIP-test που συνάγονται από τις καμπύλες OJIP φθορισμού chl a για το σπανάκι (Μέσοι όροι, $n=15$) για 6 πειραματικές ημέρες. (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 14, (γ) Ημέρα 20, (δ) Ημέρα 28, (ε) Ημέρα 35, (στ) Ημέρα 42. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν σύμφωνα με την μεταχείριση Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων, το * υποδηλώνει διαφορές μεταξύ του Control και των άλλων δύο ομάδων, ενώ το ** υποδηλώνει διαφορές μεταξύ όλων των ομάδων στο $p \leq 0,05$ 80

Γράφημα 10. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το σπανάκι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (gs), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$)..... 82

Γράφημα 11. Καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός (Light curves) για το σπανάκι κατά τη διάρκεια του πειράματος (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). (α) Ημέρα 10. (β) Ημέρα 20. (γ) Ημέρα 30. (δ) Ημέρα 45. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα..... 82

Γράφημα 12. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων σπανακιού κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένα ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νωπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$)..... 84

Γράφημα 13. (α) Ολική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη a + b και. (β) PRI (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε ημέρα πειράματος ($p \leq 0,05$)..... 98

Γράφημα 14. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων JIP που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φθορισμού της chl a στο σταμναγκάθι (μέσοι όροι, $n=15$) από εβδομαδιαίες μετρήσεις: (α) ημέρα 8, (β) ημέρα 15, (γ) ημέρα 22, (δ) ημέρα 29 και (ε) ημέρα 35. Οι τιμές

κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, όλα τα σημάδια αναφέρονται σε διαφορές μεταξύ των φυτών του Control και των άλλων δύο ομάδων (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,05$ ενώ το ** δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,001$).	99
Γράφημα 15. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το σταμναγκάθι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$). Η απουσία γραμμάτων δείχνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.	100
Γράφημα 16. Καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός για το σταμναγκάθι κατά τη διάρκεια του πειράματος (Μέσοι όροι \pm SEM, n=4). (α) Ημέρα 8. (β) Ημέρα 15. (γ) Ημέρα 25. (δ) Ημέρα 35. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα.....	101
Γράφημα 17. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων σταμναγκαθιού μετρημένη κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένα ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νωπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).....	102
Γράφημα 18. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών στον βασιλικό κατά τη διάρκεια του πειράματος (α) chl _a , (β) chl _b , (γ) car (Μέσοι όροι \pm SEM, n=12). Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε ημέρα πειράματος ($p \leq 0,05$).	125
Γράφημα 19. Τιμές PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στον βασιλικό (Μέσοι όροι \pm SEM, n=20). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).	126
Γράφημα 20. Αραχνοδειδή γραφήματα των παραμέτρων JIP που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φθορισμού της chl a στον βασιλικό (μέσοι όροι, n=20) από τις μετρήσεις: (α) ημέρα 15, (β) ημέρα 30, (γ) ημέρα 45, (δ) ημέρα 60. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας Nettle. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,05$).	126

Γράφημα 21. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για τον βασιλικό. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, n=12). Η απουσία γραμμμάτων υποδεικνύει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).....	127
Γράφημα 22. Καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από το φως για τον βασιλικό (Μέσοι όροι \pm SEM, n=8). (α) Ημέρα 15, (β) Ημέρα 30 (γ) Ημέρα 45, (δ) Ημέρα 60. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα, ενώ η απουσία γραμμμάτων στο A_{max} και Rd υποδεικνύει απουσία διαφορών.	128
Γράφημα 23. Διακύμανση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των φύλλων κατά την πειραματική περίοδο, (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νωπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα και η απουσία γραμμμάτων μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).....	130
Γράφημα 24. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και οι μεταξύ τους αναλογίες κατά την πειραματική περίοδο στην μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 6), (α) chl _a , (β) chl _b , (γ) car, (δ) λόγος chl a/b, (ε) λόγος chl _s /car. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$) και η απουσία γραμμμάτων στα (α) και (γ) υποδηλώνει μη σημαντικές διαφορές.	153
Γράφημα 25. Τιμές του δείκτη PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στη μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).....	154
Γράφημα 26. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φθορισμού της chl a στην μέντα (μέσοι όροι, n = 15) από τις μετρήσεις: (α) ημέρα 7, (β) ημέρα 14, (γ) ημέρα 22, (δ) ημέρα 28, (ε) ημέρα 35 και (στ) ημέρα 45. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας FF5. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * υποδεικνύει διαφορές της ομάδας FF2 με τις ομάδες FF3 και FF5, το ** διαφορές της ομάδας FF3 με τις ομάδες FF2 και FF5, το *** διαφορές της ομάδας FF5 με τις ομάδες FF2 και FF3 σε $p \leq 0,05$).....	155
Γράφημα 27. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για την μέντα. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E)	

(Μέσοι όροι \pm SEM, n = 6). Η απουσία γραμμάτων δείχνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$). 156

Γράφημα 28. Καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από το φως για την μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 4). (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 22, (γ) Ημέρα 45. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ημέρα και η απουσία γραμμάτων μη σημαντικές διαφορές για κάθε ημέρα ($p \leq 0,05$). 156

Γράφημα 29. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων μέντας κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νεπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα και η απουσία γραμμάτων μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$). 158

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύγκριση υδροπονικών και ενυδρειοπονικών θρεπτικών διαλυμάτων για καλλιέργειες φυτών μαρουλιού, βασιλικού και τομάτας (δεδομένα από Delaide, 2017; Delaide et al., 2016; Solis-Toaranta et al., 2020).	22
Πίνακας 2. Παραδείγματα συγκαλλιέργειας φυτών – ψαριών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ενυδρειοπονίας.....	28
Πίνακας 3. Οι επιλεγμένες παράμετροι που προέρχονται από τη επαγωγή φθορισμού OJIP με τις εξισώσεις και τις επεξηγήσεις τους (Κυζερίδου, 2015).	47
Πίνακας 4. Φυσικοχημικές και ποιοτικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο, εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM (n=117 για pH, n=60 για DO και EC, n=21 για NH ₃ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe, K, Ca ²⁺ , Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).....	51
Πίνακας 5. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας (Μέσοι όροι \pm SEM, n= 90). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).	51
Πίνακας 6. Παράμετροι ανάπτυξης του μαρουλιού που μετρήθηκαν στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=24). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	52
Πίνακας 7. Θρεπτική σύσταση των φύλλων μαρουλιού στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=4). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g ⁻¹ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	57
Πίνακας 8. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο, εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM (n=120 για pH, n=60 για DO και EC, n=12 για την ομάδα Control και n=21 για τις ομάδες Fe, Fe+K για τα θρεπτικά συστατικά NH ₃ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe, K, Ca ²⁺ , Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	75
Πίνακας 9. Διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων νιτρικών, σιδήρου και καλίου σε εβδομαδιαία βάση (Μέσοι όροι \pm SEM). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) ενώ η – υποδηλώνει απουσία δεδομένων.	75

Πίνακας 10. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στις πειραματικές ημέρες 20 και 45 (Μέσοι όροι \pm SEM, n=30). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	76
Πίνακας 11. Θρεπτική σύσταση σπανακιού μετά τη συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g ⁻¹ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).....	83
Πίνακας 12. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι \pm SEM, n=93 για το pH, n=48 για DO και EC, n=18 για NH ₃ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe, K, Ca ²⁺ και Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	95
Πίνακας 13. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας (Μέσοι όροι \pm SEM, n=30). Η απουσία εκθέτων υποδηλώνει μη στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).....	96
Πίνακας 14. Παράμετροι ανάπτυξης στο σταμναγκάθι στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6 για το LSM και n=15 για τις υπόλοιπες παραμέτρους). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).	97
Πίνακας 15. Θρεπτική σύσταση των φύλλων στο σταμναγκάθι στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g ⁻¹ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).	102
Πίνακας 16. Συστατικά και θρεπτική σύσταση των σιτηρέσιων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα για την σίτιση της κόκκινης τιλάπιας.	114
Πίνακας 17. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι \pm SEM, n=204 για pH, DO και EC, n=36 για NH ₃ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , K, Ca ²⁺ και Na, n=68 για Fe). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).	122
Πίνακας 18. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στην 1 ^η και 2 ^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, n=40 για το βάρος, μήκος, WG, SGR, FCR, επιβίωση, n=200 για ημερήσια κατανάλωση τροφής, n=3 για πρωτεΐνη, λίπος). Οι διαφορετικοί εκθέτες υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή ξεχωριστά ($p \leq 0,05$).....	123

Πίνακας 19. Παράμετροι ανάπτυξης στον βασιλικό στην 1 ^η και 2 ^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, n=20). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) σε κάθε κοπή.	123
Πίνακας 20. Θρεπτική σύσταση των φύλλων βασιλικού στην 1 ^η και 2 ^η κοπή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g^{-1} ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή ($p \leq 0,05$).	129
Πίνακας 21. Απόδοση και σύσταση αιθέριου ελαίου βασιλικού (% αιθέριου ελαίου) και οι χρόνοι εμφάνισης τους κατά τη χρωματογραφία με GC-MS (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) και η παύλα (-) σημαίνει απουσία της ουσίας στην αντίστοιχη ομάδα.	131
Πίνακας 22. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 120 για pH, n = 63 για DO και EC, n = 21 για NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Fe, K, Ca^{2+} και Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).	149
Πίνακας 23. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στην 1 ^η και 2 ^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 30 για το βάρος, μήκος, WG, SGR, FCR, επιβίωση, n = 60 για ημερήσια κατανάλωση τροφής, n = 3 για παραγωγή, πρωτεΐνη, λίπος). Οι διαφορετικοί εκθέτες υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή ξεχωριστά ($p \leq 0,05$).	150
Πίνακας 24. Παράμετροι ανάπτυξης στην μέντα στην 1 ^η και 2 ^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 15). Η απουσία διαφορετικών εκθετών σημαίνει μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).	151
Πίνακας 25. Θρεπτική σύσταση των φύλλων μέντας στην 1 ^η και 2 ^η κοπή (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g^{-1} ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων στην 2 ^η κοπή, ενώ η απουσία γραμμμάτων στην 1 ^η κοπή υποδηλώνει μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).	157
Πίνακας 26. Απόδοση και σύσταση αιθέριου ελαίου μέντας (% αιθέριου ελαίου) και οι χρόνοι εμφάνισης τους στο χρωματογράφημα (Μέσοι όροι \pm SEM, n = 3). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).	159

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενυδραιοπονία είναι ένα σύστημα ταυτόχρονης καλλιέργειας φυτών και ψαριών που παράγει τροφή στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Συνδυάζει την υδροπονία και την εκτροφή ψαριών συνδέοντας τα δύο υπο-συστήματα μέσω της ανακυκλοφορίας νερού και θρεπτικών. Τα προϊόντα του μεταβολισμού των ψαριών και η τροφή που δεν έχει καταναλωθεί εμπλουτίζουν το νερό με τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Η μετατροπή των αποβλήτων σε πόρους κάνει την ενυδραιοπονία ένα πολλά υποσχόμενο και φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα καλλιέργειας. Εντούτοις, σημαντικό μειονέκτημα της φαίνεται να είναι ότι κάποια από τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών βρίσκονται σε ελλειμματικές συγκεντρώσεις. Ο στόχος της παρούσας διατριβής ήταν να εξετάσει διεξοδικά τις λειτουργικές αποκρίσεις των φυτών, συμπεριλαμβάνοντας φυσιολογικές, βιοχημικές και αναπτυξιακές παραμέτρους, αλλά και την ανάπτυξη των ψαριών σε ενυδραιοπονικά συστήματα εργαστηριακής κλίμακας ώστε να αποτυπώσει τη δυναμική των καλλιεργειών και να διερευνήσει τα αδύνατα σημεία της ενυδραιοπονίας και τους περιορισμούς που αυτά θέτουν.

Η διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε σε τρεις άξονες-ενότητες. Στην 1^η ενότητα μελετήθηκαν οι προαναφερθείσες λειτουργικές αποκρίσεις τριών καλλιεργειών όταν αναπτύσσονται με προσθήκη θρεπτικών που ακολουθεί την προσέγγιση των «ελάχιστων δυνατών εισροών». Στην 2^η και 3^η ενότητα μελετήθηκαν οι επιπτώσεις ποιοτικών και ποσοτικών αλλαγών στα σιτηρέσια των ψαριών στις λειτουργικές αποκρίσεις των φυτών. Σε όλες τις περιπτώσεις τα φυτά αναπτύχθηκαν σε συγκαλλιέργεια με κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis sp.*) και έφτασαν μέχρι το εμπορεύσιμο μέγεθός τους. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου μελετήθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα οι ανταλλαγές αερίων και η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από το φως, η κατάσταση και αποδοτικότητα της φωτοσυνθετικής συσκευής μέσω του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo*, οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών, η θρεπτική σύσταση των φύλλων και η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών, όπως και φυσικοχημικές παράμετροι και η ποιότητα του νερού, μαζί με αναπτυξιακές παραμέτρους των φυτών και των ψαριών. Στις περιπτώσεις των αρωματικών φυτών, βασιλικού και μέντας, εκτιμήθηκε επίσης, η επίδραση των μεταχειρίσεων στην απόδοση και ποιοτική σύσταση του αιθέριου ελαίου.

Στην 1^η ενότητα πραγματοποιήθηκαν τρία ανεξάρτητα πειράματα με καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa* ποικιλίας Romana), σπανακιού (*Spinacia oleracea* ποικιλίας

Virofly) και σταμναγκαθιού (*Cichorium spinosum*). Μελετήθηκαν τρία διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα, α) επιπλέον Fe, β) συνδυασμός Fe+K, με μάρτυρα την γ) ομάδα Control, η οποία ήταν νερό ενυδρείου χωρίς επιπλέον εισροές. Στο μαρούλι, τα φυτά Control εμφάνισαν ήδη από την 14^η ημέρα του πειράματος μειώσεις στη φωτοσύνθεση και την αποδοτικότητα της φωτοσυνθετικής συσκευής. Αυτές οι πρώιμες ενδείξεις συνεχίστηκαν και στην υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος, με αντίστοιχες μειώσεις σε συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών, αντιοξειδωτική ικανότητα και ανάπτυξη, το σύνολο των οποίων αποδίδεται σε ανεπάρκεια Fe, K και Mn, όπως απέδειξε η θρεπτική ανάλυση των φύλλων. Η προσθήκη Fe οδήγησε στη διατήρηση υψηλών ρυθμών φωτοσύνθεσης και λειτουργικότητας της φωτοσυνθετικής συσκευής καθ' όλη την αναπτυξιακή περίοδο, χωρίς συμπτώματα καταπόνησης. Εντούτοις, η συμπληρωματική προσθήκη K κρίνεται απαραίτητη για την εξασφάλιση της μέγιστης απόδοσης του μαρουλιού, καθώς στα φυτά Fe+K αυξήθηκε σημαντικά η παραγωγή κατά 41 και 54% συγκριτικά με τις ομάδες Fe και Control αντίστοιχα. Επιπλέον, η συμπλήρωση θρεπτικών συστατικών αύξησε τον ειδικό ρυθμό αύξησης στην τιλάπια.

Τα φυτά σπανακιού στην ομάδα Control παρουσίασαν ήδη από την 10^η ημέρα του πειράματος εκτεταμένη χλώρωση και λειτουργικές βλάβες που αποδόθηκαν σε τροφοπενία σιδήρου και εν τέλει προκάλεσαν μία σημαντικά μειωμένη ανάπτυξη. Η τελευταία φάνηκε να είναι το αποτέλεσμα μίας συντονισμένης μείωσης της απορρόφησης φωτός, της αποδοτικότητας της χρήσης του φωτός, της φωτοχημείας και των διαδικασιών καρβοξυλίωσης, τα οποία συνολικά συνδέονται με την πρώιμη απώλεια χλωροφυλλών και πιθανώς με δομικά προβλήματα στην φωτοσυνθετική συσκευή. Αντίθετα, τα φυτά σπανακιού στην ομάδα Fe παρουσίασαν παρόμοια ανάπτυξη και λειτουργία με τα φυτά της ομάδας Fe+K αλλά τα ξεπέρασαν στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, φωτοσυνθετικό ρυθμό και φωτοχημική απόδοση, κυρίως λόγω της υψηλότερης ανά φωτόνιο απόδοσης στη ροή ηλεκτρονίων. Η ανάπτυξη των ψαριών έμεινε ανεπηρέαστη από την προσθήκη θρεπτικών συστατικών στο σύστημα. Η τροφοπενία σιδήρου αποδείχτηκε ως το σημαντικότερο αδύναμο σημείο για την καλλιέργεια σπανακιού σε συζευγμένα συστήματα ενυδρείου, και τα αποτελέσματα αποδεικνύουν πως μόνο η συμπλήρωση σιδήρου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργία και την απόδοση στο σπανάκι.

Η τροφοπενία σιδήρου ήταν καθοριστική και για την καλλιέργεια του σταμναγκαθιού όπως αποτυπώθηκε στην ομάδα Control, η οποία κατέγραψε κατώτερη απόδοση όσον αφορά τη φωτοχημεία, την περιεχόμενη χλωροφύλλη, την αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός και τελικά τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Τα φυτά σταμναγκαθιού στις μεταχειρίσεις Fe και

Fe+K παρουσίασαν παρόμοια υψηλή απόδοση σε όλες τις παραμέτρους που μελετήθηκαν και επιτεύχθηκε 4,5 και 4,0 φορές υψηλότερη απόδοση σε σχέση με την ομάδα Control αντίστοιχα. Τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των ψαριών και η επιβίωση παρέμειναν ανεπηρέαστα από τα διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η ενυδρείοποιία είναι ένα σύστημα καλλιέργειας με πολλά πλεονεκτήματα για την καλλιέργεια σταμναγκαθιού, με την προϋπόθεση να συμπληρώνεται σίδηρος ώστε να επιτυγχάνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα στην απόδοση ολιγοτροφικών αυτοφυών ειδών.

Στη 2^η ενότητα μελετήθηκαν οι λειτουργικές αποκρίσεις του πλατύφυλλου βασιλικού (*Ocimum basilicum*) σε δύο διαφορετικά ως προς την ποιότητα και σύνθεσή τους σιτηρέσια της τιλάπιας, με χρήση της τσουκνίδας (*Urtica dioica*) ως εναλλακτική λύση στην αντικατάσταση του σογιάλευρου των εμπορικών τροφών. Μελετήθηκαν α) ολική αντικατάσταση του σογιάλευρου με άλευρο τσουκνίδας σε αναλογία 30% της τροφής (Nettle), σε σύγκριση με β) την βέλτιστη τροφή του είδους (Control). Στη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικές κοπές του υπέργειου μέρους των φυτών και εκτός από τις μετρήσεις που αναφέρθηκαν στην αρχή, εδώ συμπεριλήφθηκαν και παράμετροι ποιότητας της σάρκας των ψαριών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το σιτηρέσιο Nettle μείωσε σημαντικά την παραγωγή των ψαριών και τον ειδικό ρυθμό αύξησης κατά 20%, ενώ ο συντελεστής μετατρεψιμότητας της τροφής σε βιομάζα αυξήθηκε κατά 50% σε σχέση με την τροφή Control. Η επιβίωση των ψαριών και η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και λίπος στην σάρκα τους παρέμεινε ανεπηρέαστη. Η ανάπτυξη των φυτών δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τις διαφορετικές τροφές, με μόνη απόκριση στον αριθμό των φύλλων που αυξήθηκε κατά 20% στην ομάδα Nettle. Και στις δύο μεταχειρίσεις καταγράφηκαν παρόμοια επίπεδα στις μετρηθείσες φυσιολογικές και βιοχημικές παραμέτρους και απουσία καταπόνησης. Η κύρια επίδραση της εφαρμογής της τσουκνίδας στην τροφή των ψαριών αποτυπώθηκε στις αναλύσεις αιθέριων ελαίων. Η απόδοση ελαίου ήταν κατά 30% μειωμένη στην ομάδα Nettle σε σύγκριση με το Control. Αντίστροφης κατεύθυνσης ήταν η επίδραση του Nettle στην ποιοτική σύσταση του ελαίου καθώς ανιχνεύθηκαν περισσότερες ουσίες συγκριτικά με το Control. Επίσης, σημαντικές διαφοροποιήσεις καταγράφηκαν και στα ποσοστά παρουσίας των διαφόρων συστατικών, με 15 ουσίες να βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα στα φυτά Nettle και μόλις σε μία να υπερτερεί το Control. Το ποσοστό ευκαλυπτόλης, που δίνει το χαρακτηριστικό έντονο άρωμα του βασιλικού αυξήθηκε κατά 85% στη μεταχείριση Nettle. Συνολικά, η παρουσία της τσουκνίδας στην ιχθυοτροφή ενυδρείοποιικής καλλιέργειας αξιολογείται ως θετική εάν ο στόχος είναι η παραγωγή βιομάζας βασιλικού και η εκμετάλλευση συγκεκριμένων συστατικών του αιθέριου ελαίου του.

Στην 3^η ενότητα της διατριβής μελετήθηκαν οι επιπτώσεις σε καλλιέργεια μέντας (*Mentha piperita*) τριών συχνοτήτων σίτισης της κόκκινης τιλάπιας: δύο (FF2, ανά έξι ώρες), τρεις (FF3, ανά τέσσερις ώρες) και πέντε (FF5, ανά δύο ώρες) φορές στην διάρκεια της ημέρας μέχρι κορεσμό. Η καλλιέργεια διήρκεσε 45 ημέρες και πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικές κοπές στο υπέργειο τμήμα των φυτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η αύξηση των γευμάτων στην διάρκεια της ημέρας έως πέντε φορές δεν επηρέασε τις αναπτυξιακές και λειτουργικές αποκρίσεις της μέντας αλλά και την ανάπτυξη των ψαριών. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα ήταν ότι η FF5 προκάλεσε αύξηση του Μπ στο υπέργειο μέρος των φυτών και αύξησε δύο ουσίες στα αιθέρια έλαια της μέντας. Οι συχνότητες σίτισης FF2 και FF3 ήταν εξίσου αποτελεσματικές για την υψηλή απόδοση των φυτών και των ψαριών. Συμπερασματικά, τα δύο γεύματα ανά 6 ώρες σε ημερήσια βάση είναι κατάλληλη και αποτελεσματική συχνότητα σίτισης της κόκκινης τιλάπιας για την παράλληλη καλλιέργεια μέντας στην ενυδραιοπονία ώστε να εξοικονομείται τροφή και να αυξάνεται η παραγωγικότητα του συστήματος.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι η πρώτη στην Ελλάδα που μελετά την ενυδραιοπονία ως εναλλακτικό σύστημα καλλιέργειας. Αποδείχτηκε ότι με μία προσέγγιση «ελάχιστων δυνατών εισροών» είναι εκτός από βιώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό, ένα αποτελεσματικό σύστημα που μπορεί να επιτύχει και υψηλές αποδόσεις, με το σταμναγκάθι να εμφανίζει τις υψηλότερες από όλα τα υπόλοιπα συμβατικά συστήματα καλλιέργειας. Εκτός των παραπάνω, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν -ανεξάρτητα από το φυτικό είδος- την αναγκαιότητα παρακολούθησης των λειτουργικών αποκρίσεων των φυτών. Αυτό διότι μπορούν να δώσουν μία έγκαιρη ένδειξη για τους περιορισμούς που προέρχονται από το ίδιο το σύστημα ενυδραιοπονίας, να περιγράψουν τις επιπτώσεις τους στους μηχανισμούς που υποστηρίζουν την ανάπτυξη των φυτών, να καταδείξουν τα αδύναμα σημεία του συστήματος και να υποδείξουν τα σημεία-στόχους για περαιτέρω βελτίωση και επιτυχή διαχείριση.

ABSTRACT

Aquaponics is an integrated crop and fish production system, which operates according to the circular economy concept to produce food. It combines hydroponics and fish farming, connecting the two sub-systems through the recirculating water and the diluted nutrients. Fish metabolism and uneaten feed enriches the water with essential nutrients for plant growth. The conversion of wastes to resources makes aquaponics a promising and environmentally friendly cultivation technique. However, the main disadvantage of aquaponics is that certain essential nutrients for plant growth are often at suboptimal concentrations. The aim of the present work was to thoroughly examine crop's functional responses, including physiological, biochemical and growth parameters, as well as fish growth performance in lab-scale aquaponics systems, to capture the cultivations dynamics and identify system's weak points and the limitations they impose.

The doctoral thesis was developed in three axes/sections. The first section includes the study of the above-mentioned functional responses of three crops when grown with nutrient inputs following the "minimum nutrient supplementation" approach. In the 2nd and 3rd section, the effects of qualitative and quantitative changes in fish diets on plant functional responses were studied. In all cases, plants were grown until they reached the marketable size, in co-culture with red tilapia (*Oreochromis* sp.). During the growing season, gas exchange and photosynthetic responses to light, the status and efficiency of the photosynthetic apparatus through chlorophyll *a* fluorescence *in vivo*, photosynthetic pigment concentrations, leaf nutrient composition and antioxidant capacity of the plants, as well as physicochemical parameters and water quality, together with plant and fish growth parameters were studied at regular intervals. In the case of the aromatic plants, basil and mint, the effect of treatments on the yield and qualitative composition of essential oil was also evaluated.

In the first section, three independent experiments were conducted with lettuce (*Lactuca sativa* var Romana), spinach (*Spinacia oleracea* var Virofly), and spiny chicory or stamnagathi (*Cichorium spinosum*). Three different nutrient solutions were studied, a) additional Fe, b) combined addition of Fe+K, and c) the Control, which refers to aquaponics water without further supplementation. In lettuce, Control plants showed reductions in photosynthesis and the efficiency of the photosynthetic apparatus as early as day 14 of the experiment. These early signs continued throughout the experiment, with corresponding decreases in photosynthetic pigment concentration, antioxidant capacity and growth, all of which were attributed to Fe, K and Mn deficiencies, as demonstrated by nutrient analysis of

the leaves. The Fe group showed high rates of photosynthesis and functionality of the photosynthetic apparatus, sustained throughout the cultivation period without stress symptoms. However, supplementation of K is considered necessary to ensure maximum lettuce yield, since Fe+K plants significantly increased lettuce production by 41 and 54% compared to Fe and Control groups respectively. Moreover, nutrient supplementation increased the specific growth rate in tilapia.

Spinach plants in the Control group showed extensive chlorosis and functional impairment already on day 10 of the experiment that were attributed to Fe deficiency and ultimately caused a significantly reduced growth. The latter appeared to be the result of a concerted reduction in light absorption and light use efficiency, along with a down-regulation of photochemistry and carboxylation processes, which together were associated with early chlorophyll loss and possibly structural problems in the photosynthetic apparatus. In contrast, spinach plants in the Fe group showed similar growth and function to plants in the Fe+K group but outperformed them in chlorophyll content, photosynthetic rate and photochemical efficiency, mainly due to higher quantum yield of electron transport. Fish growth was unaffected by further nutrient input into the system. Iron deficiency proved to be the major weak point for spinach cultivation in coupled aquaponics systems, and the results demonstrate that sole iron supplementation can significantly improve the function and performance of spinach.

In stamnagathi plants, Fe deficiency was crucial in shaping the responses of Control group, which showed inferior performance in terms of photochemistry, chlorophyll content, light use efficiency, and, subsequently, photosynthetic activity. Fe and Fe+K-treated plants exhibited similarly high performance in all studied parameters and achieved 4.5- and 4-fold increased yields, respectively, compared to Control. Fish growth characteristics and survival rates remained unaffected. The results demonstrate that aquaponics is an advantageous cropping system for stamnagathi, and that sole Fe supplementation is adequate to promote excellent performance and yield of this oligotrophic native species.

In the second section, the functional responses of broad-leaf basil (*Ocimum basilicum*) were studied when two feeds of tilapia were applied, which differed in quality and composition. The first one used nettle (*Urtica dioica*) as an alternative to totally replace soybean meal in commercial feeds, thus a nettle meal in proportion of 30% of the diet was included (Nettle) and was compared to the optimal diet of the species (Control). During the experiment, two successive cuts of the aboveground part of the plants were performed and, in addition to the measurements mentioned at the beginning, fish flesh quality parameters were included. The

results showed that the Nettle diet significantly reduced fish production and specific growth rate by 20%, while the feed biomass conversion factor increased by 50% compared to the Control diet. Fish survival and the protein and fat content of fish flesh remained unaffected. Plant growth was not significantly affected by the different diets, with the only response being the 20% increase in the leaf number of the Nettle group. Similar levels of all measured physiological and biochemical parameters were recorded in both treatments, without any stress symptoms. The main effect of nettle application on fish feed was found in the essential oil analyses. Oil yield was reduced by 30% in the Nettle group compared to the Control. In the opposite direction was the effect of Nettle on oil quality composition as more substances were detected compared to the Control. Significant differences were also recorded in the contribution of different components, with 15 substances being at higher levels in the Nettle plants and only one being exceeded by the Control. The percentage of eucalyptol, which gives the characteristic strong aroma of basil, increased by 85% in the Nettle treatment. Overall, the presence of nettle in aquaponic fish feed is evaluated as positive if the objective is to produce basil biomass and to exploit specific components of its essential oil.

In the third section of the thesis, the effects of different feeding frequencies of red tilapia on mint (*Mentha piperita*) cultivation were studied. The treatments were a) two (FF2, every six hours), b) three (FF3, every four hours) and c) five (FF5, every two hours) times during the day *ad libitum*. The experiment lasted 45 days and two successive cuts were performed in the aboveground part of the plants. The results showed that increasing meals during the day up to five times did not affect the growth and functional responses of mint as well as fish growth. The most important results were that FF5 caused an increase in Mn content of mint leaves and increased two substances in the essential oil. Feeding frequencies FF2 and FF3 were equally effective for high plant and fish performance. In conclusion, two meals every 6 h daily is a suitable and effective feeding frequency for red tilapia in the co-cultivation with mint in aquaponics to avoid feed waste and increase the productivity of the system.

This PhD thesis is the first in Greece to study aquaponics as an alternative farming system. It has been shown that with a " minimum nutrient supplementation " approach, besides being sustainable and environmentally friendly, it is an effective system that can achieve high yields, with stamnagathi showing the highest yields compared to all other conventional farming systems. In addition to the above, the results demonstrate - irrespective of the plant species - the necessity of monitoring the functional responses of the plants. They can give an early indication of constraints originating from the aquaponic system itself, describe their effects on

the mechanisms underlying plant growth, highlight weak points of the system and indicate target points for further improvement and successful management.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

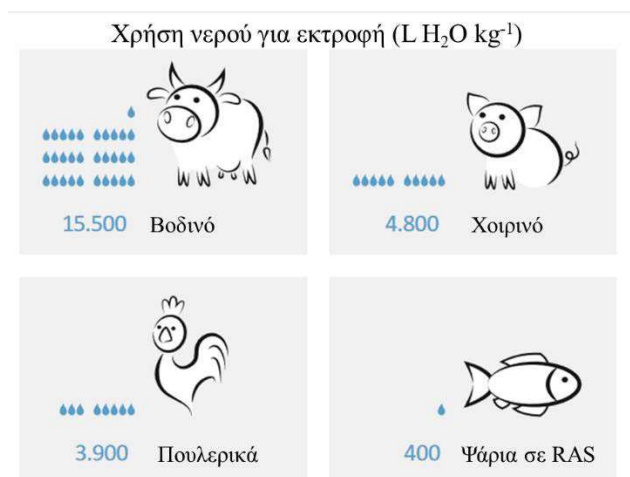
Η κάλυψη των διατροφικών αναγκών ενός ολοένα αυξανόμενου ανθρώπινου πληθυσμού απαιτεί, σύμφωνα με υπολογισμούς, την αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων κατά 50% μέχρι το 2050, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες το ποσοστό αυτό μπορεί να φτάσει και το 100% (Alexandratos & Bruinsma, 2012; FAO, 2017; WHO, 2015). Ταυτοχρόνως, καταγράφεται μία μετατόπιση των διατροφικών προτιμήσεων προς την κατανάλωση κρέατος και γαλακτοκομικών δημιουργώντας μία περεταίρω πίεση στην αλυσίδα παραγωγής τροφίμων (Whitton et al., 2021), αλλά και αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής αυτών. Η τελευταία έχει σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος, σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία που επιβεβαιώνουν την συνεισφορά της στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου εξαιτίας των αερίων που παράγονται (Ridou et al., 2021; Shafiullah et al., 2021). Έρευνες έχουν δείξει ότι μία αντίθετη κατεύθυνσης αλλαγή στις προτιμήσεις από κρέας/γαλακτοκομικά σε προϊόντα προερχόμενα από την αγροτική παραγωγή είναι αποτελεσματική στην μείωση της απαιτούμενης ενέργειας παραγωγής αλλά και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Almiron & Zoppeddu, 2015; Cocking et al., 2020). Όσον αφορά την αγροτική παραγωγή, φαίνεται πως θα υπάρξει μία αύξηση στη ζήτηση κατά 1,1 – 1,5% ετησίως μέχρι το 2050 (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Ωστόσο, για την κάλυψη αυτής της ζήτησης μπαίνουν τρία προβλήματα που προκαλούνται από την αυξανόμενη αστικοποίηση του ανθρώπινου πληθυσμού. Το πρώτο αφορά τη μείωση του εργατικού δυναμικού στον αγροτικό τομέα που φτάνει το 20% έως το 2015 σε παγκόσμιο επίπεδο (FAO, 2017). Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την εγκατάλειψη των αγροτικών εκτάσεων που παραδοσιακά χρησιμοποιούνταν για καλλιέργειες (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Από το 1960 έως το τέλος του 1990 η πρωτογενής παραγωγή μειώθηκε λόγω του περιορισμού της καλλιεργούμενης γης παγκοσμίως κατά 13% (Bruinsma, 2003). Το τρίτο πρόβλημα που προκαλεί η μετακίνηση των πληθυσμών στα αστικά κέντρα είναι η δημιουργία της ανάγκης για μεταφορά αγαθών σε μεγάλες αποστάσεις. Τα «τροφομίλια» αναφέρονται στην απόσταση που μεταφέρονται τα τρόφιμα από τον τόπο παραγωγής στον τελικό καταναλωτή, έχοντας μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και έντονη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα (Mikloutsch & Woschank, 2022).

Η μείωση των αποθεμάτων γλυκού νερού είναι ένα ολοένα αυξανόμενο ζήτημα που απασχολεί λόγω των αναγκών για εντατικοποίηση της πρωτογενούς παραγωγής και της κλιματικής αλλαγής (Maucieri et al., 2017). Συγκεκριμένα, οι προβλέψεις για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επισημαίνουν την μειωμένη διαθεσιμότητα νερού με αντίστοιχη

μείωση των αγροτικών αποδόσεων μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα (Water, 2015). Το αποτύπωμα νερού είναι ένα μέτρο της ανθρώπινης χρήσης των αντίστοιχων πόρων και διαπιστώθηκε ότι η πρωτογενής παραγωγή αντιπροσωπεύει το 92% της παγκόσμιας χρήσης γλυκού νερού, ενώ η βιομηχανική παραγωγή χρησιμοποιεί το 4,4%, ενώ το οικιακό νερό μόνο το 3,6% (Hoekstra & Mekonnen, 2012). Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (Ο.Η.Ε.) έχει προβλέψει πως οι συνήθειες αγροτικές πρακτικές που εφαρμόζονται θα οδηγήσουν σε παγκόσμια έλλειψη νερού που θα φτάσει το 40% έως το 2030 (UNITED NATIONS, 2016). Η ελάττωση της ποιότητας και ποσότητας των αποθεμάτων νερού είναι συνεπώς κατά βάση θέμα προβληματικής διαχείρισής του στον πρωτογενή τομέα. Αντίστοιχα προβληματικές πρακτικές σχετικά με την εκτεταμένη χρήση φυτοπροστατευτικών ουσιών και λιπασμάτων οδήγησαν σε περαιτέρω υποβάθμιση του εδάφους (Celikkol Erbas & Guven Solakoglu, 2017; Mahankale, 2023). Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία, σε 12 χρόνια (2002 – 2013) η κατανάλωση λιπασμάτων αυξήθηκε από 36 σε 55 kg ανά στρέμμα, με αποτέλεσμα την αύξηση των νιτρικών και φωσφορικών ιόντων στα υδάτινα οικοσυστήματα (Pocketbook, 2015). Η υποβάθμιση του εδάφους είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για την διατήρηση της αγροτικής παραγωγής. Επιπλέον, τα οικοσυστήματα των περιοχών με ξηρό κλίμα απειλούνται από ερημοποίηση και είναι ακατάλληλα για αγροτική χρήση. Όλοι οι προαναφερθέντες λόγοι υποβάθμισης και περιορισμού της καλλιεργήσιμης γης καθιστούν ανέφικτο το σενάριο επέκτασης των αγροτικών εκτάσεων που θεωρείται απολύτως απαραίτητο σύμφωνα με τα μοντέλα πρόβλεψης της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων μέχρι το 2050 (Emadodin et al., 2012; Williams et al., 2021).

Η αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων περνάει μέσα από την εξοικονόμηση νερού, την εκμετάλλευση υποβαθμισμένων εκτάσεων και τη μείωση των τροφομιλίων, με μία ταυτόχρονη έμφαση σε βιώσιμο τρόπο εντατικοποίησης της πρωτογενούς παραγωγής. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η εύρεση μεθόδων παραγωγής τροφίμων υψηλής διατροφικής αξίας με οικονομικό τρόπο, κοντά στις αστικές περιοχές για την άμεση πρόσβαση τους στους καταναλωτές (Sayara et al., 2016). Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν αγροτικές τεχνικές με χαμηλές απαιτήσεις εισροής νερού, με στόχο την μείωση της σπατάλης του αλλά και την επαναχρησιμοποίηση του (Goddek et al., 2015). Η έκθεση του ΟΗΕ για την Παγκόσμια Ανάπτυξη του Νερού (2017) έχει επισημάνει τη σημασία των λυμάτων ως πηγή ενέργειας, θρεπτικών συστατικών και άλλων χρήσιμων υποπροϊόντων (Connor et al., 2017). Παράλληλα, τόνισε την σημασία επαναχρησιμοποίησης του νερού με την ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλων και προσιτών τεχνολογιών, νομικών και ρυθμιστικών πλαισίων και μηχανισμών χρηματοδότησης που θα επιτρέψουν μία αυξημένη κοινωνική αποδοχή της επεξεργασίας

λυμάτων στο πλαίσιο μιας κυκλικής οικονομίας (Campbell, 2017). Με βάση τα παραπάνω, απαιτούνται καινοτόμα συστήματα καλλιέργειας υψηλής παραγωγικότητας που θα εξασφαλίσουν κατά το δυνατόν την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών με ταυτόχρονη έμφαση στην αειφορία και το χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Brandí, 2017). Η ενυδρειοπονία είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση που καλύπτει τα παραπάνω ζητήματα παράγοντας υψηλής ποιότητας διατροφικά προϊόντα στηριζόμενη στην μετατροπή των αποβλήτων σε πόρους σύμφωνα με την έννοια της κυκλικής οικονομίας (Blidariu et al., 2013; Silva et al., 2018).



Εικόνα 1. Η χρήση του νερού κατά την διαδικασία παραγωγής προϊόντων ζωικής προέλευσης, όπως το βοδινό και το χοιρινό κρέας, τα πουλερικά και τα ψάρια σε κλειστά συστήματα ανακυκλοφορίας νερού. Κάθε σταγόνα στο σχήμα ισοδυναμεί με 500 λίτρα νερό. Τροποποιημένο σχήμα από (Joyce, et al., 2019).

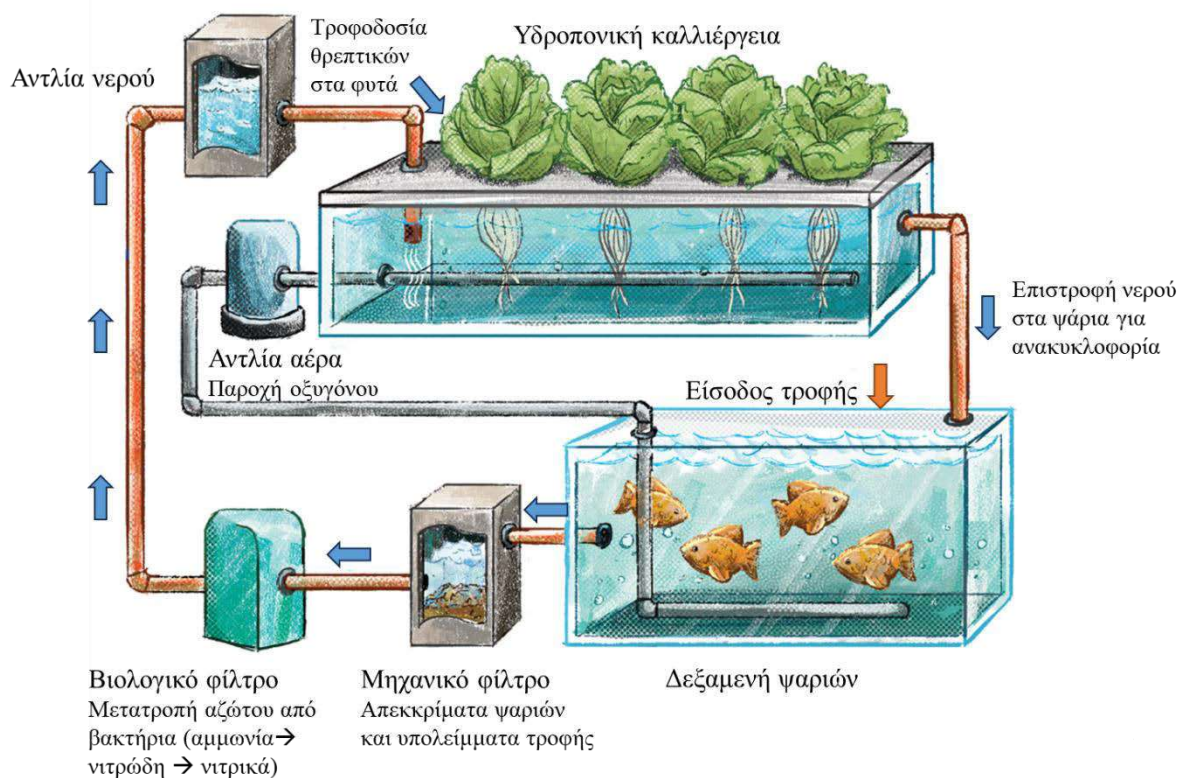
1. Ενυδρειοπονία, αρχή λειτουργίας και πλεονεκτήματα

Η ενυδρειοπονία είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα πολυκαλλιέργειας, το οποίο στηρίζεται στην έννοια της κυκλικής οικονομίας για την παραγωγή τροφίμων. Συνδυάζει την καλλιέργεια φυτών σε εκτός εδάφους συστήματα (υδροπονία) και την ιχθυοκαλλιέργεια σε κλειστά συστήματα επανακυκλοφορίας νερού (recirculating aquaculture systems, RAS), συνδέοντας τα δύο υποσυστήματα μέσω της κυκλοφορίας του νερού και των θρεπτικών συστατικών που βρίσκονται διαλυμένα σε αυτό (Rakocy, et al., 2004). Τα προϊόντα του μεταβολισμού των ψαριών και η τροφή που δεν καταναλώνεται, εμπλουτίζουν το νερό με απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Ο σύνδεσμος των δύο προαναφερθέντων υποσυστημάτων είναι τα νιτροποιητικά βακτήρια (*Nitrosomonas* spp. και *Nitrobacter* spp.), που εκτελούν τον κομβικής σημασίας για την ενυδρειοπονία κύκλο του αζώτου. Αναλαμβάνουν τη μετατροπή της αμμωνίας (NH₃) που παράγεται από την εκτροφή

των ψαριών σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-) που αποτελούν μια χρήσιμη πηγή αζώτου για τα φυτά, μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης (Delaide et al., 2017). Με αυτόν τον τρόπο τα φυτά, τα ψάρια και τα βακτήρια συνυπάρχουν σε ένα ισορροπημένο κοινό σύστημα.

Σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας (Εικόνα 2) το νερό κυκλοφορεί από τη δεξαμενή των ψαριών στις δεξαμενές των φίλτρων όπου πραγματοποιείται η απομάκρυνση στερεών και διαλυμένων αποβλήτων μέσω του μηχανικού φίλτρου (Endut et al., 2016). Στη συνέχεια το νερό μεταφέρεται στο βιολογικό φίλτρο όπου αναπτύσσονται τα νιτροποιητικά βακτήρια, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω. Τελικά το υδατικό διάλυμα ρέει στο υδροπονικό σύστημα με αποτέλεσμα τα απόβλητα από τα ψάρια να χρησιμοποιούνται ως θρεπτικά συστατικά για τα φυτά (Medina et al., 2016). Μέσω της απορρόφησης των θρεπτικών από τα φυτά επιτυγχάνεται η ανάπτυξή τους αλλά και η απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών στο νερό, που επιστρέφει ξανά «καθαρισμένο» στο σύστημα εκτροφής των ψαριών από την απορροή του υδροπονικού συστήματος ολοκληρώνοντας τον κύκλο (Johnson et al., 2017). Τα συστήματα ενυδραιοπονίας χρησιμοποιούν θρεπτικά συστατικά από την είσοδο της τροφής και τα απόβλητα των ψαριών για να ελαχιστοποιήσουν ή να εξαλείψουν την ανάγκη για επιπλέον λίπανση στα φυτά (Kloas et al., 2015). Επομένως, το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι μετατρέπουν το απόβλητο σε πολύτιμη πηγή θρεπτικών. Παράλληλα, συμβάλλουν στην αποδοτικότερη χρήση του νερού, καθώς αυτή είναι σημαντικά μειωμένη. Έχει υπολογιστεί ότι στην ενυδραιοπονία απαιτείται μόνο το 10% της συνολικής ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται για την ίδια καλλιέργεια στο έδαφος.

Συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν πιο γρήγορα στην ενυδραιοπονία σε σχέση με τις συμβατικές καλλιέργειες σε έδαφος επιτυγχάνοντας αποδόσεις κατά 20-25% μεγαλύτερες (Albadwawi et al., 2022; Lenz et al., 2021). Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ενυδραιοπονική καλλιέργεια επιτρέπει στον καλλιεργητή να παρακολουθεί και να διαχειρίζεται τις συνθήκες καλλιέργειας των φυτών σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας τις βέλτιστες συνθήκες συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών, pH και θερμοκρασίας (Atique et al., 2022). Ταυτοχρόνως, όπως σε όλες τις εκτός εδάφους καλλιέργειες, το ριζικό σύστημα των φυτών έρχεται απ' ευθείας σε επαφή με το θρεπτικό διάλυμα παρακάμπτοντας τη μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους που επηρεάζει σημαντικά την διαθεσιμότητα και απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών (Castillo-Castellanos et al., 2016). Επιπλέον, δεν υπάρχει ανταγωνισμός με ζιζάνια ενώ τα φυτά ωφελούνται από τον καλύτερο έλεγχο παρασίτων και ασθενειών (Stouvenakers et al., 2019). Τέλος, δεν απαιτούνται φυτοφάρμακα και εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων (Pantanella et al., 2011).



Εικόνα 2. Σχηματική διάταξη ενός ενυδρειοπονικού συστήματος. Εμφανίζονται τα κύρια στοιχεία του και αναφέρεται ο ρόλος τους. Η διαδικασία ξεκινά με την είσοδο της τροφής στις δεξαμενές των ψαριών. Τα γαλάζια βέλη δείχνουν την ροή του νερού στο σύστημα. Τροποποιημένο σχήμα από (<https://ag.purdue.edu/envision/the-big-idea-hydroponics-aquaponics/>)

Σημαντικό πλεονέκτημα της ενυδρειοπονίας είναι και η βελτιωμένη χρήση γης, με όρους τόσο μειωμένης έκτασης όσο και δυνατότητας εγκατάστασης σε άγονες περιοχές (Maucieri et al., 2017). Η παραγωγική διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί ακόμη και σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις γης, σε περιαστικές ή αστικές περιοχές -πιο κοντά στις αγορές. Έτσι, μειώνεται το αποτύπωμα άνθρακα που σχετίζεται με τις αγροτικές εκμεταλλεύσεις και τη μεταφορά προϊόντων στις αγορές των πόλεων, μειώνοντας τα τροφομίλια (Beckers, 2019). Ένα βελτιωμένο οικολογικό αποτύπωμα για την παραγωγή υψηλής ποιότητας προϊόντων πρωτεϊνικής σύστασης και λαχανικών μέσω της ενυδρειοπονίας μπορεί να μειώσει περισσότερο την οικολογική πίεση και να αποτελέσει ανάχωμα στην εξάντληση πολύτιμων φυσικών πόρων σε αντίθεση με τη συμβατική γεωργία (Nichols & Savidon, 2012). Όλα τα παραπάνω καθιστούν την ενυδρειοπονία μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο αειφορικής παραγωγής βιοασφαλών τροφίμων με χαμηλό ενεργειακό και υδατικό αποτύπωμα (Hoevenaars et al., 2018; Love et al., 2015).

3. Ιστορική ανασκόπηση και υφιστάμενη κατάσταση

Η ενυδρειοπονία είναι μία αρχαία μέθοδος πολυκαλλιέργειας που χρησιμοποιείται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσέγγιση της ενυδρειοπονίας καταγράφηκε το 1150 – 1350 π.Χ. από τους Αζτέκους στην περιοχή του Μεξικού όπου φαίνεται να είναι οι πρώτοι που σχεδίασαν πλωτές καλλιέργειες φυτών (*chinampas*) λόγω έλλειψης χώρου (Kledal & Thorarinsdottir, 2018). Πιο κοντά σε αυτό που γνωρίζουμε σήμερα ως ενυδρειοπονία καταγράφηκε σε καλλιέργειες την νοτίου Κίνας και της Ταϊλάνδης όπου εξέτρεφαν ψάρια ανάμεσα στις καλλιέργειες ρυζιού (Rakocy, et al., 2004). Οι δεκαετίες του '70 και του '80 ήταν καθοριστικές για τον σχεδιασμό του συστήματος που έχουμε σήμερα, ο οποίος υλοποιήθηκε από τον Rakocy στο University of Virgin Islands (UVI) (Rakocy, et al., 2004). Ο Naegel, (1977) μελέτησε για πρώτη φορά την παραγωγή των ειδών *Oreochromis mossambicus* και *Cyprinus carpio* σε κλειστό σύστημα εκτροφής ψαριών με ανακυκλοφορία νερού RAS καλλιεργώντας ταυτόχρονα μαρούλια και τομάτες με υδροπονική μέθοδο χωρίς εξωγενείς προσθήκες. Αυτό το πρώτο πλήρως κλειστό, κυκλικό σύστημα περιλάμβανε βιολογικά φίλτρα διήθησης, δεξαμενή καθίζησης των κοπράνων και φίλτρο για την νιτροποιητική διαδικασία.

Η πρώτη μεγάλη εμπορική εγκατάσταση ενυδρειοπονίας που ονομάζεται Bioshelters ιδρύθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '80 στη Μασαχουσέτη των ΗΠΑ (Kledal & Thorarinsdottir, 2018). Στα επόμενα χρόνια άρχισαν οι δοκιμές και εφαρμογές ποικίλων παραλλαγών, όπως για παράδειγμα η μέθοδος πλωτής καλλιέργειας (κλίνη φυτών) που υιοθετήθηκε τελικά ως μία πρακτική μέθοδος για καλλιέργειες μεγάλης έκτασης (Graber & Junge, 2009). Σήμερα η ενυδρειοπονία για εμπορική χρήση εφαρμόζεται σε διάφορες περιοχές του κόσμου όπως η Αυστραλία, η Σιγκαπούρη, τα Αραβικά Εμιράτα, το Μεξικό, ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, το Βιετνάμ, η Αγγλία, η Γερμανία και η Ελβετία (Thorarinsdottir, 2015). Παράλληλα μελετώνται και διαφορετικές πηγές ενέργειας για την λειτουργία του συστήματος όπως η παραγωγή βιοαερίου ή τα φωτοβολταϊκά συστήματα που σε μελλοντικά βήματα θα αξιοποιηθούν περισσότερο (Baiyin et al., 2020; Gigliona, 2015).

Στην Ελλάδα η ενυδρειοπονία είναι πρακτικώς ανύπαρκτη, καθώς δεν εφαρμόζεται σε κλίμακα παραγωγής αλλά περιορίζεται σε μικρές (οικιακές) εκμεταλλεύσεις. Σε ερευνητικό επίπεδο από το 2017 έχει πραγματοποιηθεί προσπάθεια για την είσοδο της ενυδρειοπονίας στα ελληνικά δεδομένα μέσω ερευνητικών προγραμμάτων και πειραμάτων σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα (Εικόνα 3) από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Ο στόχος ήταν και παραμένει η κατανόηση του συστήματος και η παραγωγή γνώσης ώστε μελλοντικά να θεσμοθετηθεί το νομικό πλαίσιο και να εφαρμοστεί η ενυδρειοπονία σε εμπορική κλίμακα.



Εικόνα 3. Συστήματα ενυδρειοπονίας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας: (α) σε εσωτερικό χώρο εργαστηριακής κλίμακας καλλιέργεια μαρουλιού με την τεχνική υποστρώματος, (β) καλλιέργεια μέντας σε πλωτά συστήματα και (γ) πιλοτικό σύστημα με καλλιέργεια τομάτας σε θερμοκήπιο.

4. Συζευγμένα και αποζευγμένα συστήματα ενυδρειοπονίας

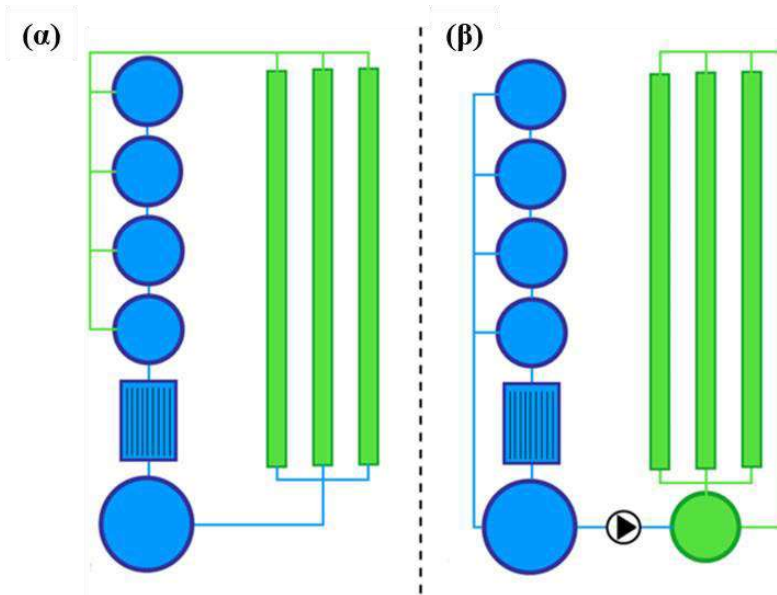
Η έννοια της ενυδρειοπονίας αναφέρεται σε ένα αλληλένδετο σύστημα στο οποίο τα υδρόβια ζώα και τα φυτά καλλιεργούνται μαζί. Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές των ενυδρειοπονικών συστημάτων, τα κλειστά ή συζευγμένα και τα ανοιχτά ή αποζευγμένα συστήματα (coupled και decoupled aquaponics αντίστοιχα). Ο διαχωρισμός τους βασίζεται στο εάν ο κύκλος του νερού είναι κλειστός μεταξύ των δύο υποσυστημάτων ψαριών και φυτών ή όχι, καθώς και σε τυχόν εξωτερικές παρεμβάσεις από την πλευρά του χειριστή/καλλιεργητή.

Στο συζευγμένο σύστημα το πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά νερό από το RAS κατευθύνεται στην υδροπονική μονάδα φυτών και επιστρέφει σε αυτό, προφανώς αφού περάσει από το μηχανικό και βιολογικό φίλτρο (Nichols & Savidon, 2012). Δεν υπάρχουν εξωτερικές παρεμβάσεις σε ότι αφορά ρύθμιση του pH ή προσθήκη επιπλέον θρεπτικών. Το συζευγμένο σύστημα λειτουργεί επομένως κυκλικά και με αυτορρύθμιση. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τόσο οι ιχθύες όσο και τα φυτά μπορούν να παραχθούν με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, λόγω των υψηλών επιπέδων επαναχρησιμοποίησης νερού, καθώς και ανακύκλωσης θρεπτικών συστατικών (Forchino et al., 2017). Από πρακτικής άποψης, το κύριο πλεονέκτημα των συζευγμένων συστημάτων έγκειται στην απλότητα των τεχνικών μετρήσεων και των απαιτήσεων ελέγχου. Το αρνητικό στοιχείο είναι οι συμβιβασμοί που θα

πρέπει να λαμβάνουν χώρα μεταξύ των δύο υπομονάδων (RAS και υδροπονία) ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού για την εξασφάλιση της μέγιστης απόδοσης και ευζωίας των ψαριών (Baganz et al., 2022). Ορισμένοι από αυτούς τους συμβιβασμούς είναι η θερμοκρασία και το pH των συστημάτων που θα πρέπει να συμβαδίζουν μεταξύ των βέλτιστων συνθηκών για τα καλλιεργούμενα φυτά και εκτρεφόμενα ψάρια. Επιπλέον, για να καλύπτονται οι θρεπτικές απαιτήσεις των φυτών η συμπλήρωση των θρεπτικών συστατικών θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή καθώς το νερό επανακυκλοφορεί στις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών και αυξημένες συγκεντρώσεις λιπασμάτων πιθανών να διαταράξουν την ευζωία και την ανάπτυξη τους.

Στα αποζευγμένα συστήματα ενυδρείοπονίας, το νερό κατευθύνεται από το RAS στο υδροπονικό υποσύστημα, αλλά δεν επιστρέφει σε αυτό. Στην διαδρομή μεταξύ RAS και καλλιέργειας φυτών πραγματοποιούνται μία σειρά παρεμβάσεων, όπως η ρύθμιση του pH με στόχο την βέλτιστη τιμή του για την μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών για τα φυτά. Επίσης, στη φάση αυτή πραγματοποιούνται συνήθως προσθήκες θρεπτικών προκειμένου οι συγκεντρώσεις αυτών να φτάσουν στα βέλτιστα επίπεδα για την ανάπτυξη των φυτών. Το νερό αυτό δεν επιστρέφει στο υποσύστημα RAS, λόγω των παραπάνω χειρισμών. Αυτού του είδους η τεχνολογία στηρίζεται σε ξεχωριστές λειτουργικές μονάδες που περιλαμβάνουν μεμονωμένους κύκλους νερού και μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα (Goddek, et al., 2016). Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό αποτελεί και το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου καθώς επιτυγχάνονται βελτιστοποιημένες συνθήκες νερού για κάθε είδος καλλιεργούμενου οργανισμού ξεχωριστά (Rodgers et al., 2022a). Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η μεγαλύτερη ασφάλεια ως προς την εκτροφή ψαριών και την καλλιέργεια φυτών σε περίπτωση προβλήματος ή τεχνικής βλάβης. Αυτό αντιμετωπίζεται ξεχωριστά σε κάθε υπομονάδα χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία ολόκληρου του συστήματος (Goddek et al., 2019). Η αποζευγμένη ενυδρείοπονία προτιμάται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα για εμπορικό σκοπό (Goddek, et al., 2016).

Κοινός καθοριστικός παράγοντας για την αποδοτικότητα και των δύο τύπων συστημάτων ενυδρείοπονίας είναι η κατανάλωση νερού που εξαρτάται από τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής. Αυτή η κατανάλωση ορίζει την ποσότητα αναπλήρωσης του νερού επομένως και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτού στο RAS, συγκεκριμένα τις συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών που προορίζονται για την τροφοδοσία των φυτών (Tyson, 2017). Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται σχηματικά ένα συζευγμένο και ένα αποζευγμένο σύστημα ενυδρείοπονίας.



Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση κάτοψης ενυδρειοπονικών συστημάτων (α) συζευγμένη ενυδρειοπονία όπου με μπλε χρωματισμούς παρουσιάζεται το σύστημα RAS (σε διάταξη από πάνω προς τα κάτω: δεξαμενές ψαριών, μηχανικό και βιολογικό φίλτρο) που τροφοδοτεί την υδροπονική καλλιέργεια (με πράσινο χρώμα) από όπου το νερό απορροής επιστρέφει στις δεξαμενές των ψαριών, (β) αποζευγμένη ενυδρειοπονία, όπου μετά το RAS σύστημα το θρεπτικό διάλυμα μεταφέρεται σε κεφαλή υδρολίπανσης για την συμπλήρωση θρεπτικών συστατικών και ρύθμιση του pH και έπειτα διοχετεύεται στην υδροπονική καλλιέργεια χωρίς την επιστροφή της απορροής (Monsees, et al., 2017).

5. Εκτροφή ψαριών σε κλειστά συστήματα

Τα συστήματα ενυδρειοπονίας είναι συνδεδεμένα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα κλειστά συστήματα επανακυκλοφορίας νερού για την εκτροφή ψαριών (RAS). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ίδιες τεχνικές φιλτραρίσματος και αερισμού του νερού, ενώ η παραγωγή ψαριών πραγματοποιείται με γνώμονα την ευζωία των εκτρεφόμενων ζώων (Pickens, 2015). Σημαντική προϋπόθεση για την ορθή εκτροφή ζώων είναι η μείωση του κινδύνου της εισροής ή της εξάπλωσης ασθενειών, δηλαδή η αυξημένη βιοασφάλεια (Riche & Garling, 2003). Η τεχνολογία των συστημάτων RAS έχει αναπτυχθεί σημαντικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες καταγράφοντας μία αύξηση στον αριθμό και μέγεθος των κλειστών κυκλωμάτων εκτροφής που υπάρχουν στον κόσμο. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που παρακολουθούνται στην εκτροφή των ψαριών σε RAS είναι το διαλυμένο οξυγόνο (dissolved oxygen – DO) όπως και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) καθώς οι τιμές τους επηρεάζουν την ανάπτυξη των ψαριών (Masser et al., 1999). Επιπρόσθετα, τα επίπεδα της αμμωνίας (NH_3) και των νιτρικών (NO_3^-) καταγράφονται τακτικά για την παρακολούθηση της νιτροποιητικής διαδικασίας που συμβαίνει στο βιολογικό φίλτρο (Tyson et al., 2008). Επίσης, μελετάται η μικροβιακή πυκνότητα και ποικιλότητα στα RAS για την αποφυγή εξάπλωσης παθογόνων

μικροοργανισμών που θέτουν σε κίνδυνο την ευζωία και ανάπτυξη των εκτρεφόμενων οργανισμών, οδηγώντας σε μείωση της επιβίωσης και της παραγωγικότητας (Elumalai et al., 2017).

Στην ενυδρειοπονία τα προϊόντα μεταβολισμού των ψαριών και η περίσσεια τροφής αποτελούν την πηγή θρεπτικών για τα φυτά, επομένως θα πρέπει το μέγεθος των επιμέρους υπομονάδων να βρίσκεται σε ισορροπία για την επάρκεια των θρεπτικών συστατικών για τα φυτά (Somerville et al., 2014). Η βέλτιστη αναλογία σε μέγεθος των επιμέρους συστημάτων μιας ενυδρειοπονικής καλλιέργειας θα πρέπει θεωρητικά να είναι δεξαμενές ψαριών : φίλτρα : καλλιέργεια φυτών 2 : 1 : 5 (Khandaker & Kotzen, 2018).

Το νερό, η ενέργεια και η τροφή των ψαριών είναι οι τρεις φυσικές εισροές για τα συζευγμένα συστήματα ενυδρειοπονίας (Love et al., 2015). Η ποσότητα και ποιότητα της τροφής εξαρτάται από τον αριθμό και την βιομάζα των εκτρεφόμενων ψαριών, εντούτοις η επιλογή των ποιοτικών χαρακτηριστικών της θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις απαιτήσεις των φυτών (Andriani et al., 2017). Περίπου το 5% των ζωοτροφών δεν καταναλώνεται από τα εκτρεφόμενα ψάρια, ενώ το υπόλοιπο 95% καταναλώνεται και αφομοιώνεται (Khakyzadeh et al., 2014). Από αυτό το ποσοστό, το 30 - 40% κατά τον μεταβολισμό μετατρέπεται σε νέα βιομάζα, ενώ το υπόλοιπο 60 - 70% απελευθερώνεται με τη μορφή κοπράνων, ουρίας και αμμωνίας (Robaina et al., 2019).

Η ποσότητα και ο ρυθμός απελευθέρωσης των αποβλήτων που προέρχονται από τα ψάρια είναι πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά στην ενυδρειοπονία και θα πρέπει να καθορίζουν το σχέδιο διαχείρισης του συστήματος, καθώς τα θρεπτικά όπως άζωτο και φώσφορος χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια των φυτών. Με προσεκτική διαχείριση της σύστασης και ποσότητας της τροφής θα μπορεί να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος δηλαδή η σχέση κόστος – αποτελεσματικότητα παραγωγής (Gosh & Chowdhury, 2019). Κατά μέσο όρο, 1 kg τροφής πρωτεϊνικής σύστασης 30% αποδίδει περίπου 27,6 g του N και 1 kg βιομάζας ψαριών απελευθερώνει στο νερό περίπου 90,4 g N και 10,5 g P (Tyson et al., 2011). Για την μείωση των εισροών που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών των φυτών σε θρέψη, εναλλακτικά χρησιμοποιούνται προσαρμοσμένες τροφές που παρασκευάζονται ειδικά για την ενυδρειοπονία (Roy et al., 2022). Αυτές ενισχύονται με πρόσθετα ώστε να καλύπτονται επιτυχώς οι ανάγκες τόσο των φυτών όσο και των ψαριών (Rono et al., 2018).

6. Βιολογικό και μηχανικό φίλτρο

Οι ρυθμοί ανάπτυξης, η ευζωία των ψαριών και η ποιότητα της παραγωγής των φυτών στο σύστημα ενυδρειοπονίας εξαρτώνται από τη δομική και λειτουργική ποικιλότητα του μικροβιώματος του συστήματος (Kasozzi et al., 2021). Προκειμένου να διεξάγονται αποτελεσματικά οι μικροβιακές διεργασίες νιτροποίησης και αποδέσμευσης θρεπτικών συστατικών, μία σειρά λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος πρέπει να ρυθμίζονται αυστηρά. Οι παράμετροι αυτές αφορούν κυρίως την ποιότητα και την κίνηση του νερού μεταξύ των υπομονάδων του συστήματος, για παράδειγμα το pH και ο ρυθμός ροής (Hussain et al., 2015).

Η ανάπτυξη και λειτουργικότητα του μικροβιακού πληθυσμού εξασφαλίζεται από το βιολογικό φίλτρο του συστήματος. Τα νιτροποιητικά βακτήρια αποικίζουν το βιολογικό υλικό του φίλτρου, το οποίο θα πρέπει να έχει μία επαρκή σε έκταση περιοχή που ονομάζεται περιοχή ειδικής επιφάνειας (Specific Surface Area – SSA) για την επιτυχημένη νιτροποιητική διαδικασία (Kasozzi et al., 2021). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω ευεργετικών βακτηρίων με κύρια γένη βακτηρίων τα *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* και *Nitrospira* που είναι αποκλειστικά αερόβιοι αυτότροφοι οργανισμοί που χρησιμοποιούν το αμμώνιο (NH_4) και τα νιτρώδη (NO_2^-) ως πηγή ενέργειας (Andriani et al., 2018; Taragusti et al., 2019). Κατά την παραπάνω διεργασία μετατρέπεται η διαλυμένη αμμωνία που προέρχεται από τις εκκρίσεις των ψαριών, αλλά είναι τοξική για αυτά, στην αβλαβή μορφή νιτρικών ιόντων που είναι απαραίτητα για την αύξηση των φυτών. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού, όπως η θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργικότητα και αύξηση των νιτροποιητικών βακτηρίων, επομένως η συνεχής καταγραφή αλλά και διαχείρισή τους είναι κομβικής σημασίας (Amin et al., 2023). Τα κύρια είδη βιολογικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται είναι τα φίλτρα άμμου και τα φίλτρα αναρρόφησης με μεγάλη ποικιλία σε υλικά και σχήματα, όπως πλαστικές βιόσφαιρες, χαλίκια και πήλινα δαχτυλίδια που τοποθετούνται σε δεξαμενές με αερισμό (Bracino et al., 2020). Επίσης χρησιμοποιούνται και βιοαντιδραστήρες σε κινούμενες κλίνες (Moving Bed Bioreactor – MBBR) αποτελούμενοι από σφαιρίδια που αναδεύονται μέσω οξυγόνωσης του νερού και απομακρύνουν το διοξείδιο του άνθρακα (Boxman et al., 2018; Thakur et al., 2023).

Το μηχανικό φίλτρο εξυπηρετεί την απομάκρυνση από το σύστημα των στερεών υλικών που προέρχονται από τις ζωοτροφές και τα περιττώματα των ψαριών. Η ύπαρξη αποβλήτων στο ενυδρειοπονικό σύστημα αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης προβλημάτων στα ψάρια λόγω της αύξησης της αμμωνίας στο νερό και τη μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου

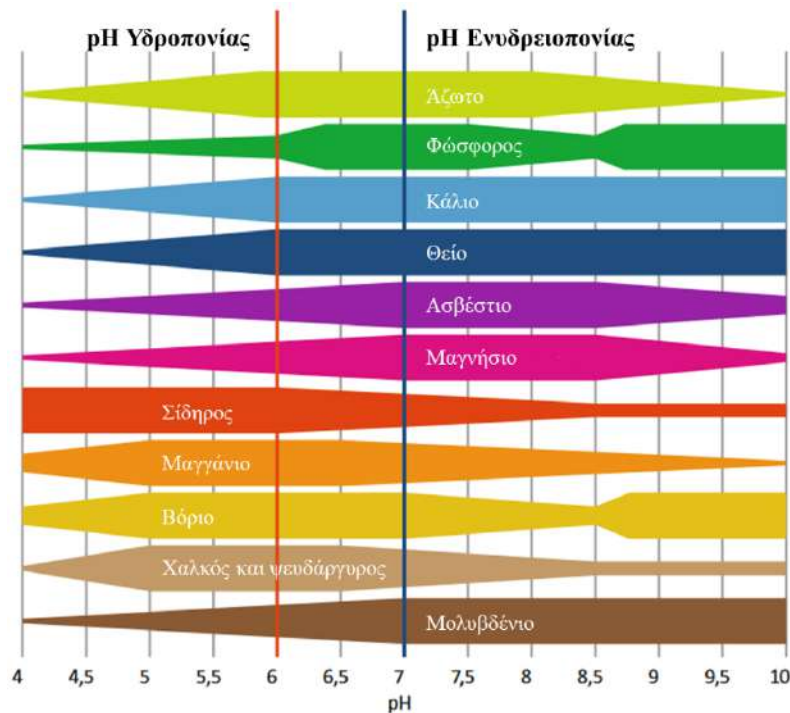
(Goddek, et al., 2016). Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση ετερότροφων βακτηρίων που ευνοούν τον εποικισμό αναερόβιων οργανισμών που απελευθερώνουν υδρόθειο, ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο για τα ψάρια (Delaide et al., 2018; Monsees, et al., 2017). Επιπλέον, επηρεάζεται η ικανότητα του βιολογικού φίλτρου λόγω της μείωσης του πληθυσμού των νιτροποιητικών βακτηρίων (Delaide et al., 2019). Γι' αυτό τον λόγο από άποψη διάταξης σε ένα σύστημα RAS τα μηχανικά φίλτρα τοποθετούνται μετά τις δεξαμενές των ψαριών και πριν από το βιολογικό φίλτρο (Davidson & Summerfelt, 2005). Ο πρώτος στόχος στην αφαίρεση στερεών είναι να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο χρόνος κατακράτησης τους στο σύστημα (Kasozzi et al., 2021). Όσο πιο γρήγορα διαχωρίζονται τα στερεά από το σύστημα, τόσο λιγότερες πιθανότητες υπάρχουν αυτά να διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια, καθιστώντας τα πιο δύσκολα στην αντιμετώπιση τους (Danaher et al., 2013). Εκτός από την θετική επίδραση που έχει αυτή η διαδικασία στην εκτροφή των ψαριών συμβάλλει επίσης και στην καλύτερη απόδοση των φυτών. Αυτό συμβαίνει γιατί η ιζηματολόαση (sludge) που σχηματίζεται από την παραγωγή κοπράνων, υπολειμμάτων τροφής και αιωρούμενων σωματιδίων, είναι υπεύθυνη για τη δέσμευση σημαντικού ποσοστού θρεπτικών συστατικών με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμα για τα φυτά (Zhang et al., 2021). Το ποσοστό συγκράτησης εξαρτάται από την περιεκτικότητα κάθε θρεπτικού και σύμφωνα με τους (Rafiee & Saad, 2005) το μεγαλύτερο ποσοστό συγκράτησης σε εκτροφή κόκκινης τιλάπιας ήταν 89% για το μαγνήσιο και 80% για το μαγγάνιο, ενώ το κάλιο έφτασε στο 18%. Για τον σχεδιασμό των φίλτρων λαμβάνεται υπόψη το φορτίο ρύπανσης από την εκτροφή των ψαριών (Lennard, 2012c). Οι κύριοι τύποι μηχανικού φίλτρου που χρησιμοποιούνται στην ενυδραιοπονία είναι τα φίλτρα που βασίζονται στην βαρύτητα (καθίζησης, διαχωριστές στροβιλισμού, διαχωριστές ακτινικών ροών), διαλογή (φίλτρο άμμου, φίλτρο χαντρών), οξειδωση (επεξεργασία με όζον) ή κλασμάτωση αφρού (Goddek et al., 2015; Somerville et al., 2014).

7. Θρεπτικό διάλυμα

Σε μία ενυδραιοπονική καλλιέργεια η ποιότητα του νερού θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά για τους οργανισμούς που καλλιεργούνται, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και οι συγκεντρώσεις θρεπτικών βρίσκονται στο βέλτιστο εύρος. Για παράδειγμα το βέλτιστο pH της εκτροφής των ψαριών στο RAS είναι διαφορετικό από αυτό της καλλιέργειας φυτών στην υδροπονία. Γι' αυτό τον λόγο, στην συζευγμένη ενυδραιοπονία επιχειρείται ένας συμβιβασμός ώστε το pH να διατηρείται κοντά στο 7,5 (Zou

et al., 2016) (Εικόνα 5). Οι απαιτήσεις του διαλυμένου οξυγόνου εξαρτώνται από το είδος των ψαριών που εκτρέφονται, ενώ η συγκέντρωση του CO₂ πρέπει να παραμένει κάτω από 20 mg L⁻¹ (Thorarinsdottir, 2015). Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία του νερού θα πρέπει να κυμαίνεται στα βέλτιστα όρια των φυτών και ψαριών που καλλιεργούνται, καθώς συμβάλει στην ευζωία των καλλιεργούμενων οργανισμών (Love et al., 2015). Στην περίπτωση της συζευγμένης ενυδραιοπονίας η θερμοκρασία του νερού θα πρέπει να ρυθμίζεται ως μία μέση τιμή και να παραμένει σταθερή καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας της τάξεως των 2 °C επηρεάζει την ανάπτυξη των ψαριών (Mullins & Nerrie, 2016). Η διαύγεια του νερού είναι μια άλλη σημαντική παράμετρος, καθώς τα αιωρούμενα στερεά θα πρέπει να βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Wang et al., 2016). Ο λόγος είναι ότι μπορούν να επηρεάσουν τα ψάρια, καθώς προσκολλώνται στα βράγχιά τους και μειώνουν τους ρυθμούς μεταφοράς οξυγόνου και απελευθέρωσης αμμωνίας. Το φορτίο αιωρούμενων στερεών συνιστάται να παραμένει κάτω από 30 mg L⁻¹ (Lennard & Goddek, 2019).

Τα θρεπτικά συστατικά του νερού θα πρέπει να βρίσκονται στις αποδεκτές συγκεντρώσεις για την μέγιστη ανάπτυξη και θρέψη των φυτών. Διάφορες συνταγές χρησιμοποιούνται στην ενυδραιοπονία, με ορισμένες να συμβαδίζουν με αυτές της καλλιέργειας των φυτών σε υδροπονικές συνθήκες (Πίνακας 1) (Vandam et al., 2017). Για παράδειγμα σε μία καλλιέργεια με φυλλώδη λαχανικά επαρκή θεωρούνται τα 100 mg L⁻¹ NO₃⁻ ενώ σε υδροπονικές καλλιέργειες με καρπούς η τιμή μπορεί να ξεπεράσει και τα 1000 mg L⁻¹ (Atique et al., 2022; Maucieri, et al., 2019). Στην ενυδραιοπονία αυτές οι συγκεντρώσεις θα πρέπει να κυμαίνονται στα αποδεκτά όρια αντοχής των ψαριών και δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τα 500 mg L⁻¹ NO₃⁻ - N για την τιλάπια του Νείλου και τα 250 mg L⁻¹ NO₃⁻ - N για το λαβράκι (Monsees et al., 2017; Torno et al., 2018).



Εικόνα 5. Παράδειγμα τυπικού διαγράμματος διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών σε διαφορετικές τιμές pH για εκτός εδάφους καλλιέργειες. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει ένα υδροπονικό σύστημα ενώ η μπλε γραμμή ένα σύστημα ενυδρείοπονίας. Τροποποιημένο σχήμα από (Lennard & Goddek, 2019).

Πίνακας 1. Σύγκριση υδροπονικών και ενυδρείοπονικών θρεπτικών διαλυμάτων για καλλιέργειες φυτών μαρουλιού, βασιλικού και τομάτας (δεδομένα από Delaide, 2017; Delaide et al., 2016; Solis-Toaranta et al., 2020).

	Μαρούλι		Βασιλικός		Τομάτα	
	Υδροπονία	Ενυδρείοπονία	Υδροπονία	Ενυδρείοπονία	Υδροπονία	Ενυδρείοπονία
pH	5,0-6,2	7,0-7,6	6,8	7,4	5,0-6,2	7,7
TAN (mg L ⁻¹)	18,0			2,2	18,0	0,33
NO ₃ ⁻ - N (mg L ⁻¹)	190-266	20-137	96	42	151	35
PO ₄ ³⁻ -P (mg L ⁻¹)	50-62	9-10	22,5	8	39	8
K (mg L ⁻¹)	210-430	44,9-106	126,6	45	254	27
Ca (mg L ⁻¹)	180-200	11,9	76	12	110	34
Mg (mg L ⁻¹)	24-50	6,5	28,2	7	24	
Fe (mg L ⁻¹)	2,2-5,0	2,5	1,02	2,5	0,8	0,2
SO ₄ ²⁻ - S (mg L ⁻¹)	36-66	15	32,2		48	
Na (mg L ⁻¹)	50-90	17	3,8			
Mn (mg L ⁻¹)	0,3-0,5		0,3	0,8	0,6	
Zn (mg L ⁻¹)	0,15-0,3		0,2	0,44	0,3	0,4
B (mg L ⁻¹)	0,3		0,19	0,19	0,2	
Cu (mg L ⁻¹)	0,05-0,15		0,08	0,05	0,05	0,04
Mo (mg L ⁻¹)	0,05		0,01	0,01	0,05	

Η κάλυψη των απαιτήσεων των φυτών σε θρεπτικά αποκλειστικά μέσω της τροφής έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας. Αρχικά οι Rakocy & Hargreaves, (1993) έδειξαν ότι η σίτιση της τιλάπιας (*Tilapia spp.*) με σιτηρέσια 32% περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη σε

ποσότητες $60 - 100 \text{ g m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$ μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες των φυτών στην ενυδραιοπονία. Αργότερα οι Endut et al., (2010) έδειξαν ότι αυτή η ποσότητα μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο φτάνοντας στα $15 - 42 \text{ g m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$ για εκτροφή αφρικανικού γατόψαρου (*Clarias gariepinus*) με καλλιέργεια υδρόβιου σπανακιού (*Ipomoea aquatica*). Η πιο πρόσφατη έρευνα του Lennard, (2012b) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για τα φυλλώδη λαχανικά η απαραίτητη ημερήσια ποσότητα τροφής ανά μονάδα επιφάνειας που θα πρέπει να εισέρχεται στο σύστημα ενυδραιοπονίας για την κάλυψη των αναγκών σε 25 φυτά μαρουλιού είναι $13 \text{ g m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$.

Η είσοδος της τροφής σε ένα συζευγμένο σύστημα ενυδραιοπονίας μπορεί να καλύψει έως και το 80% των θρεπτικών αναγκών των φυτών (Rakocy et al., 2004). Ένα μεγαλύτερο ποσοστό έχει καταγραφεί από τον Lennard που έφτασε το 90%, ενώ η ποσότητα θρεπτικών που λείπει για την βέλτιστη θρέψη των φυτών καλύπτεται από συμπληρώματα καλίου, ασβεστίου και σιδήρου, που προστίθενται στο σύστημα με μορφή λιπασμάτων ή ρυθμιστικών διαλυμάτων για την παράλληλη ισορρόπηση του pH (Lennard & Goddek, 2019). Επιπλέον, τα θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα μπορούν να χορηγηθούν σε μορφή ψεκασμού στα φύλλα, χωρίς επιβάρυνση του θρεπτικού διαλύματος (Elhindi et al., 2016; Roosta & Mohsenian, 2012). Με βάση τους κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως ενυδραιοπονικά χαρακτηρίζονται τα συστήματα των οποίων τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται από την τροφή των ψαριών σε ποσοστό μεγαλύτερο από 50% (Palm et al., 2018).

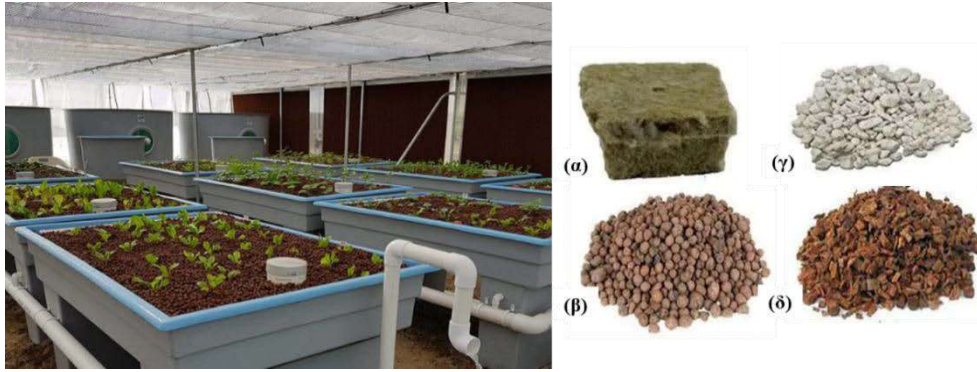
8. Μέθοδοι καλλιέργειας φυτών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εκτός εδάφους καλλιέργειας φυτών, αλλά οι κύριοι τρεις είναι η καλλιέργεια σε υπόστρωμα (Media Bed Technique - MBT), η καλλιέργεια σε συστήματα επίπλευσης (Deep Water Culture - DWC) και η καλλιέργεια με χρήση λεπτού στρώματος θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Technique - NFT) (Somerville et al., 2014). Η επιλογή του ενυδραιοπονικού τύπου καλλιέργειας φυτών εξαρτάται από το είδος των φυτών που πρόκειται να καλλιεργηθούν (όπως, φυλλώδη ή καρποδοτικά λαχανικά) καθώς κάθε σύστημα εμφανίζει και διαφορετικά πλεονεκτήματα (Forchino et al., 2017; Lennard & Leonard, 2006). Η καλλιέργεια σε υπόστρωμα είναι η μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο. Συγκεκριμένα, σε καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa*) με εκτροφή *Maccullochella peelii peelii* οι Lennard & Leonard, (2006) παρατήρησαν μεγαλύτερη

ανάπτυξη των φυτών στο σύστημα με υπόστρωμα ($5,05 \text{ kg m}^{-2}$), ενδιάμεση στο σύστημα επίπλευσης ($4,47 \text{ kg m}^{-2}$) και μικρότερη στο σύστημα τύπου NFT ($4,13 \text{ kg m}^{-2}$). Επιπλέον, η καλλιέργεια τομάτας παρουσιάζει αύξηση σε υπόστρωμα κοκοφοίνικα ($18,7 \text{ kg m}^{-2}$) συγκριτικά με τα συστήματα επίπλευσης ($17,4 \text{ kg m}^{-2}$) και NFT ($17,5 \text{ kg m}^{-2}$) (Schmautz et al., 2016). Παρόλα αυτά η έρευνα των Goda et al., (2015) επισημαίνει ότι τα συστήματα NFT και επίπλευσης είναι εξίσου αποδοτικά για τα φυτά αλλά εμφανίζουν και πλεονέκτημα ως προς την διαχείριση και την ευκολία χρήσης προς τους καλλιεργητές αλλά και του τελικού κόστους εγκατάστασης του συστήματος.

8.1. Καλλιέργεια σε υπόστρωμα

Σημαντικό ρόλο στην υπομονάδα της υδροπονίας έχει η χρήση των υποστρωμάτων (Εικόνα 6), γι' αυτό το λόγο, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες που συγκρίνουν διαφορετικά υποστρώματα για την αξιολόγηση της βέλτιστης επιλογής συστήματος για κάθε καλλιέργεια. Τα κύρια υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην ενυδρείοπονία είναι ο περλίτης (Rakocy et al., 2006) και η διογκωμένη άργιλος (Graber & Junge, 2009). Χρησιμοποιούνται όμως και άλλα υλικά όπως το ηφαιστιογενές χαλίκι, ο πετροβάμβακας, η ελαφρόπετρα, αλλά και οργανικά υποστρώματα όπως ίνες καρύδας, πριονίδι και τύρφη (Khandaker & Kotzen, 2018). Επίσης, η χρήση της άμμου θεωρείται ένα εξαιρετικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη των φυτών ωστόσο οι McMurtry et al., (1990) και ο Rakocy, (2012) ανέφεραν ότι η άμμος μπορεί να φράξει τις σωληνώσεις του συστήματος, γι' αυτό και πρότειναν την χρήση χοντρόκοκκης άμμου για την αποφυγή του προβλήματος. Μία άλλη έρευνα των Roosta & Afsharipoor, (2012) δείχνει ότι η χρήση του περλίτη ως υπόστρωμα σε σχέση με τον κοκοφοίνικα εμφανίζει μεγαλύτερη απόδοση για τη φράουλα και μεγαλύτερο αριθμό φρούτων σε καλλιέργεια με τα είδη κυπρίνων *Ctenopharyngodon idella* και *Hypophthalmichthys molitrix*. Ο ζεόλιθος είναι ένα άλλο είδος υποστρώματος που έχει χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη του μαρουλιού με εκτροφή κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis* sp.) (Rafiee & Saad, 2006). Μία μικρή ποσότητα ζεόλιθου (10g) για καλλιέργεια αρτίβλαστων μαρουλιού μπορεί να επιφέρει στατιστικά σημαντική αύξηση στην ανάπτυξη. Επιπλέον λόγω της ιοντοανταλλακτικής ικανότητας του ζεόλιθου μπορεί να απορροφά αμμωνιακά ιόντα ακόμη και σε συστήματα με συνεχή παραγωγή αμμωνίας όπως στην ενυδρείοπονία. Οι θρυμματισμένες πέτρες και οι πέτρες προερχόμενες από ποτάμια ως υπόστρωμα έχουν χρησιμοποιηθεί στην ενυδρείοπονία σε καλλιέργεια μέντας (*Mentha arvensis*) με κυπρίνο (*Cyprinus carpio*) (Shete et al., 2017).



Εικόνα 6. Καλλιέργεια ενυδρειοπονίας με τεχνική υποστρώματος σε θερμοκήπιο (<https://ajayfibreglass.com.au/>). Δεξιά, διάφορα υλικά υποστρώματος: (α) πετροβάμβακας, (β) διογκωμένη άργιλος (γ) περλίτης, και (δ) ίνες καρύδας (<https://nosoilsolutions.com/>).

8.2. Καλλιέργεια σε πλωτά συστήματα

Η μέθοδος καλλιέργειας σε πλωτά συστήματα πραγματοποιείται με την τοποθέτηση των φυτών σε φύλλα πολυστυρενίου, με τις ρίζες των φυτών να βυθίζονται πλήρως στο νερό (Εικόνα 7). Για την τοποθέτηση των φυτών χρησιμοποιούνται διάτρητα φυτοδοχεία (netpots) στα οποία συνήθως τοποθετείται υπόστρωμα, όπως διογκωμένη άργιλος, μαζί με το ριζικό σύστημα του φυτού για την στήριξη του (Hussain et al., 2014). Αυτή η μέθοδος είναι η πιο κοινή για μεγάλες εμπορικές καλλιέργειες ενυδρειοπονίας και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την καλλιέργεια φυλλωδών λαχανικών και αρωματικών φυτών όπως μαρούλι και βασιλικός (Lenz et al., 2021; Rakocy, et al., 2004). Είναι κατάλληλη για την εφαρμογή της σε συστήματα μεγάλης κλίμακας καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοματισμός της παραγωγής με καλλιέργεια φυτών σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης (Pantanella et al., 2011). Απαραίτητη προϋπόθεση για την βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών με αυτή την τεχνική είναι η παροχή οξυγόνου στις ρίζες μέσω αερισμού με αντλίες αέρα (Thorarinsdottir, 2015).



Εικόνα 7. Καλλιέργεια μαρουλιού σε πλωτά συστήματα (α) στο θερμοκήπιο (<https://theaquaponicsource.com/>) και (β) το ριζικό σύστημα των φυτών (<https://gogreenaquaponics.com/>).

8.3. Καλλιέργεια σε NFT

Στη μέθοδο του λεπτού στρώματος θρεπτικού διαλύματος (NFT) χρησιμοποιούνται οριζόντιες πλαστικές σωληνώσεις όπου μέσα σε αυτές ρέει το θρεπτικό διάλυμα σε λεπτό στρώμα (Εικόνα 8). Τα φυτά τοποθετούνται μέσα σε διάτρητα φυτοδοχεία όπως και στην μέθοδο επίπλευσης με το ριζικό τους σύστημα να είναι σε άμεση επαφή με το στρώμα του θρεπτικού διαλύματος (Nicoletto et al., 2018). Η τεχνική καλλιέργειας NFT χρησιμοποιείται εξίσου με την τεχνική επίπλευσης λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν συγκριτικά με την μέθοδο καλλιέργειας σε υπόστρωμα (Lennard & Leonard, 2006). Το μέγεθος των σωληνώσεων ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της καλλιέργειας, για παράδειγμα τα καρποδοτικά λαχανικά απαιτούν σωληνώσεις διαμέτρου 11 cm ενώ τα φυλλώδη λαχανικά 7,5 cm (Somerville et al., 2014). Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η μειωμένη εξάτμιση του θρεπτικού διαλύματος, επειδή το νερό είναι προστατευμένο από το φως και το θερμικό του φορτίο λόγω των σωληνώσεων, όπως και στην μέθοδο επίπλευσης (Nelson & Pade, 2007).

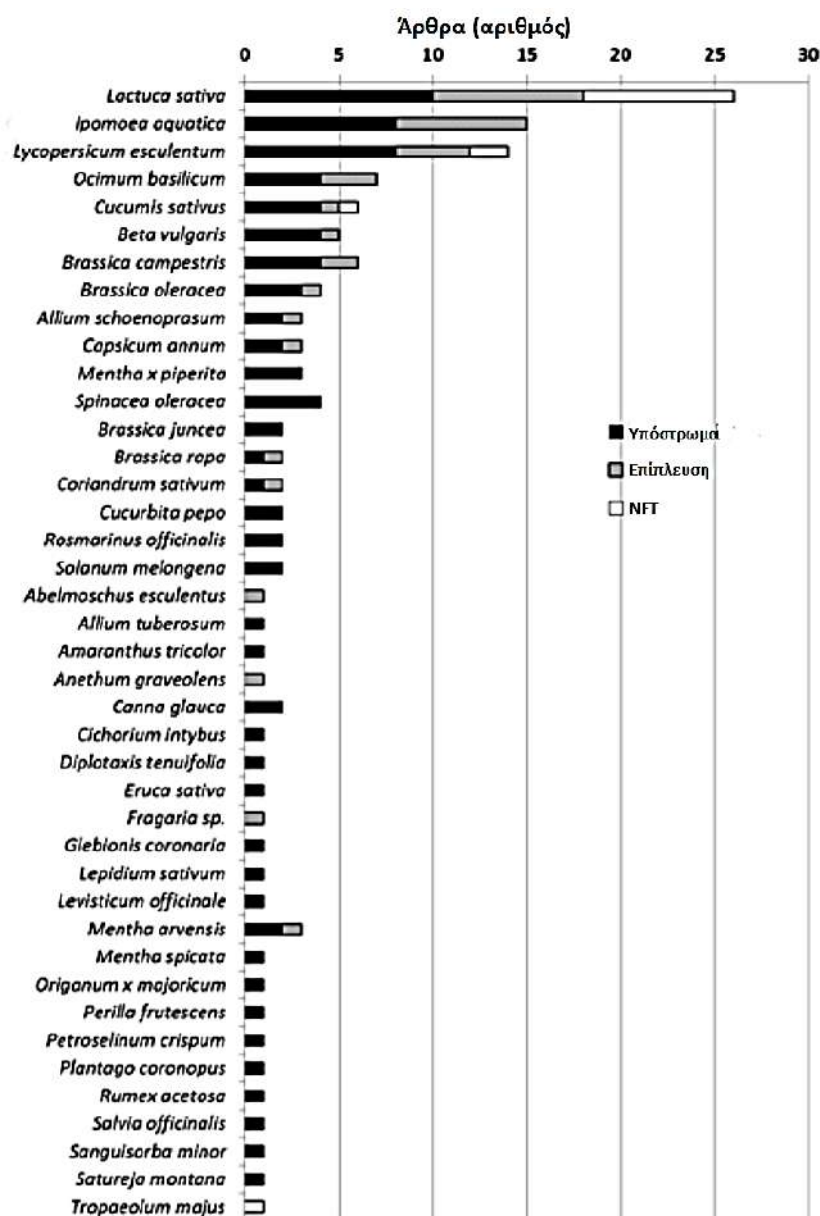


Εικόνα 8. Καλλιέργεια φυλλωδών λαχανικών με την μέθοδο NFT (α) στο θερμοκήπιο και (β) τοποθέτηση φυτών σε διάτρητα φυτοδοχεία. (<https://foodrevolution.org/blog/hydroponics/>).

9. Είδη καλλιεργούμενων φυτών και εκτρεφόμενων ψαριών

Στην ενυδρειοπονία τα πιο ευρέως καλλιεργούμενα είδη είναι το μαρούλι (*Lactuca sativa*), το υδρόβιο σπανάκι (*Ipomea aquatica*), και η τομάτα (*Lycopersicon esculentum*) (Maucieri et al., 2017). Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται τα είδη των φυτών που έχουν καλλιεργηθεί σε διαφορετικούς τύπους συστημάτων ενυδρειοπονίας. Το κυρίαρχο είδος ψαριού που εκτρέφεται στην ενυδρειοπονία είναι η τιλάπια με διάφορα υποείδη και υβρίδια αυτής όπως η τιλάπια του Νείλου (*Oreochromis niloticus*) και η κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis sp.*) (Setiadi et al., 2018).

Η επιλογή του συνδυασμού φυτών και ψαριών εξαρτάται σημαντικά από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού και την αλατότητά του αλλά και τις απαιτήσεις φυτών – ψαριών (Lennard & Goddek, 2019). Έχουν διεξαχθεί πειράματα ακόμη και σε είδη που διαβιούν σε θαλασσινό νερό, στην περίπτωση όμως αυτή τα καλλιεργούμενα φυτά είναι ανθεκτικά στην καταπόνηση της αυξημένης αλατότητας, ή είναι αλόφυτα (Vlahos et al., 2019). Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται ορισμένοι συνδυασμοί φυτών και ψαριών που έχουν δοκιμαστεί στην ενυδρειοπονία.



Εικόνα 9. Είδη φυτών που έχουν καλλιεργηθεί σε διαφορετικούς τύπους συστημάτων ενυδρειοπονίας (Maucieri et al., 2018).

Πίνακας 2. Παραδείγματα συγκαλλιέργειας φυτών – ψαριών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ενυδρειοπονίας.

Είδη ψαριών	Είδη φυτών	Πηγές
<i>Oreochromis</i> sp.	<i>Ipomoea aquatica</i>	(Liang & Chien, 2013)
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	<i>Coriandrum sativum</i> L.	(Buzby et al., 2016)
	<i>Petroselinum crispum</i>	
	<i>Lactuca sativa</i>	
<i>Oreochromis</i> sp	<i>Plantago coronopus</i>	(Knaus & Palm, 2017b)
<i>Clarias gariepinus</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	
	<i>Origanum majorana</i>	
	<i>Petroselinum crispum</i>	
<i>Oreochromis niloticus</i> × <i>Oreochromis mossambicus</i>	<i>Ipomea aquatica</i>	(Wang et al., 2016)
<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	(Rakocy et al., 2004)
<i>Maccullochella peelii peelii</i>	<i>Lactuca sativa</i>	(Lennard & Leonard, 2006)
<i>Perca fluviatilis</i>	<i>Cucumis sativus</i>	(Graber & Junge, 2009)
	<i>Solanum lycopersicum</i>	
<i>Cyprinus carpio</i>	<i>Mentha spicata</i>	(Roosta, 2014b)
	<i>Raphanus sativus</i>	
	<i>Petroselinum crispum</i>	
	<i>Coriandrum sativum</i>	
<i>Carassius auratus</i>	<i>Spinacia oleracea</i>	(Shete et al., 2013)
<i>Sparus aurata</i>	<i>Crithmum maritimum</i>	(Vlahos et al., 2019)
<i>Dicentrarchus labrax</i>	<i>Lactuca sativa</i>	(Stathopoulou et al., 2021)
<i>Clarias gariepinus</i>	<i>Amaranthus</i> spp.	(Mamat et al., 2016)
	<i>Ipomea aquatica</i>	
<i>Osphronemus goramy</i>	<i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i>	(Purwandari et al., 2017)
<i>Huso</i> × <i>Acipenser ruthenus</i>	<i>Lactuca sativa</i>	(Dediu, 2012)
<i>Hypsibarbus wetmorei</i> ♂ × <i>Barbonymus gonionotus</i> ♀	<i>Apium graveolen</i>	(Ogah et al., 2020)
	<i>Coriandrum sativum</i>	
	<i>Mentha</i> × <i>piperita</i>	
<i>Hypsibarbus wetmorei</i> ♂ × <i>Barbonymus gonionotus</i> ♀	<i>Mentha</i> × <i>piperita</i>	(Ogah et al., 2020)

10. Θρέψη φυτών και ενυδρειοπονία

Η ανόργανη θρέψη των φυτών ξεκινά με την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών σε ιοντική μορφή, τα οποία είναι διαλυμένα στο νερό που κυκλοφορεί στο ενυδρειοπονικό σύστημα και συνεχίζει με την αφομοίωσή τους μέσα στο φυτικό σώμα (Hoevenaars et al., 2018). Η απορρόφηση πραγματοποιείται από το ριζικό σύστημα των φυτών, επηρεάζεται σημαντικά από το pH του θρεπτικού διαλύματος, ταυτόχρονα προκαλώντας αλλαγές σε αυτό (Eck et al., 2019). Συγκεκριμένα, μόλις τα κατιόντα εισέλθουν στη ρίζα προκαλούν την έξοδο

πρωτονίων (H^+) με αποτέλεσμα την μείωση του pH, ενώ η απορρόφηση ανιόντων οδηγεί στην έκκριση υδροξυλίων (OH^-) και την αύξηση του pH (Maucieri et al., 2019). Ο φώσφορος είναι ένα στοιχείο που εξαρτάται ισχυρά από το pH του θρεπτικού διαλύματος, με τα PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} και H_2PO_4 να είναι οι κύριες μορφές που προσλαμβάνουν τα φυτά (Cerozi & Fitzsimmons, 2016). Το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο είναι διαθέσιμα στα φυτά σε ένα ευρύ φάσμα pH, αλλά οι συγκεντρώσεις άλλων ιόντων μπορεί να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα τους (Blanchard et al., 2020; Roosta & Hamidpour, 2011). Οι πιο κατάλληλες τιμές pH για την ανάπτυξη της υδροπονικής καλλιέργειας είναι μεταξύ 5,5 και 6,5 όμως αυτό σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα θα είχε ως αποτέλεσμα την μειωμένη νιτροποιητική ικανότητα καθώς το βέλτιστο εύρος pH για τη διαβίωση των βακτηρίων είναι 7,5 – 8,5 (Joyce et al., 2019; Wortman, 2015).

Εκτός των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του νερού και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία του αέρα και του υποστρώματος και η σχετική υγρασία ασκούν σημαντική επίδραση στην απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών (Kasozi et al., 2019; Lennard, 2012a). Η απορρόφηση του N μειώνεται λόγω μη βέλτιστων θερμοκρασιών, ενώ του K, P, Mn, Zn, Cu και Mo επηρεάζονται αρνητικά από χαμηλές θερμοκρασίες στο επίπεδο της ρίζας (Nichols & Lennard, 2010) (Buzby & Lin, 2014; Delaide et al., 2017).

Παρακάτω αναλύονται με συντομία οι βασικοί ρόλοι των κύριων θρεπτικών στοιχείων στην λειτουργία των φυτών, ενώ στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται οι ανταγωνιστικές και συνεργατικές σχέσεις μεταξύ τους και οι επιδράσεις της απορρόφησής τους στο pH.

- Το **άζωτο (N)** είναι ένα ανόργανο στοιχείο που τα φυτά χρειάζονται σε μεγάλες ποσότητες διότι αποτελεί συστατικό μεγαλομορίων όπως οι πρωτεΐνες, τα αμινοξέα και νουκλεϊκά οξέα, αλλά και σημαντικών μεταβολιτών του πρωτογενούς και δευτερογενούς μεταβολισμού των φυτών (Αϊβαλάκης et al., 2016). Απορροφάται σε διάφορες μορφές από τα φυτά με κυρίαρχη αυτή των νιτρικών ιόντων. Η συνήθης περιεκτικότητα των φυτών σε άζωτο κυμαίνεται από 3 – 5 % ξηρού βάρους (Garcia-Servin et al., 2021). Η επάρκεια αζώτου οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, και προσδίδει στα φύλλα των φυτών έντονο πράσινο χρώμα λόγω αυξημένης βιοσύνθεσης χλωροφύλλης. Αντίθετα η έλλειψη αζώτου στα φυτά αποτυπώνεται μακροσκοπικά με ανοιχτό πράσινο χρώμα στα ώριμα φύλλα των φυτών που στη συνέχεια γίνονται χλωρωτικά ή καφέ και πέφτουν από το φυτό. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να μην εμφανιστεί στα νεαρότερα φύλλα λόγω της κινητικότητας του στοιχείου μέσα στο φυτικό σώμα. Επομένως η έλλειψη αζώτου σε ένα φυτό μπορεί να αποτυπωθεί με τα

ανώτερα φύλλα του σε ανοιχτό πράσινο και τα γηραιότερα φύλλα με κίτρινο ή καφέ χρώμα. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι η μειωμένη ανάπτυξη και επιτάχυνση της ολοκλήρωσης του βιολογικού κύκλου (Mendoza-Tafolla et al., 2019). Η έλλειψη αζώτου προκαλεί μείωση της φωτοσύνθεσης, ως τελικό αποτέλεσμα μιας πολυεπίπεδης επίδρασης σε ένζυμα του κύκλου του Calvin, αλλά και πρωτεϊνικά σύμπλοκα που εμπλέκονται στις φωτεινές αντιδράσεις (Mu & Chen, 2021). Παράλληλα, λόγω της έλλειψης αζώτου μειώνονται εξειδικευμένες πρωτεΐνες που συμμετέχουν στα φωτοσυλλεκτικά μεγαλομοριακά σύμπλοκα (light-harvesting complexes proteins - LHCs) των PSII και PSI και σχετίζονται με τις φωτεινές αντιδράσεις στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Evans & Clarke, 2019). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων και να αυξάνεται η απολεσθείσα ενέργεια ως μορφή θερμότητας (Mu & Chen, 2021).

- Το **κάλιο (K)** είναι απαραίτητο για την ωσμωρρύθμιση των φυτικών κυττάρων, επιτελώντας ως εκ τούτου σημαντικό ρόλο, μεταξύ άλλων, στις διαδικασίες διάτασης και επιμήκυνσης των κυττάρων, αλλά και στο άνοιγμα και κλείσιμο των στομάτων (Taiz & Zeiger, 2011). Το κάλιο απαιτείται ως συμπαράγοντας σε περισσότερα από 80 ένζυμα, πολλά εκ των οποίων εμπλέκονται στην αναπνοή και στη φωτοσύνθεση. Η βέλτιστη περιεκτικότητα στα φύλλα κυμαίνεται από 2 – 5 % ξηρού βάρους (Tewari et al., 2021). Το πρώτο σύμπτωμα που παρατηρείται κατά την έλλειψη καλίου είναι η διάστικτη ή περιφερειακή χλώρωση, η οποία στην συνέχεια οδηγεί σε νέκρωση κυρίως στις κορυφές ή περιφερειακά στα φύλλα. Λόγω της δυνατότητας μεταφοράς καλίου στο φυτικό σώμα προς τα νεαρά φύλλα, τα παραπάνω συμπτώματα παρατηρούνται στα πιο ώριμα φύλλα προς τη βάση του φυτού. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της έλλειψης καλίου είναι ότι τα φύλλα μπορεί να κατασρώνουν ή να ζαρώνουν και οι βλαστοί να είναι αδύναμοι και ισχνοί με αποτέλεσμα το φυτό να γέρνει εύκολα. Η ανεπάρκεια καλίου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ευαισθησία στην έκθεση των φυτών σε χαμηλές θερμοκρασίας, υδατική καταπόνηση και προσβολή από μύκητες (Pandey et al., 2020). Στην ενυδρευσιμότητα το κάλιο βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα και η απορρόφηση του από τα φυτά παραμένει σε εξίσου χαμηλές τιμές σε σχέση με την υδροπονία (Stathoroulou et al., 2021).
- Ο **φώσφορος (P)** είναι αναπόσπαστο συστατικό των φωσφολιπιδίων των κυτταρικών μεμβρανών, των νουκλεϊκών οξέων, αλλά και σημαντικών ενώσεων αναπνοής και της φωτοσύνθεσης, όπως για παράδειγμα των φωσφορικών σακχάρων (Αϊβαλάκης et al.,

2016). Επιπρόσθετα, ο φώσφορος είναι συστατικό των φωσφορυλιωμένων νουκλεοτιδίων που συμμετέχουν στον ενεργειακό μεταβολισμό όπως το ATP. Η απορρόφηση του φωσφόρου μπορεί να περιοριστεί σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας υποστρώματος (<13 °C) ή αυξημένες τιμές pH (> 6,5), οδηγώντας σε συμπτώματα ανεπάρκειας (Vance et al., 2003). Η περιεκτικότητα φωσφόρου στα φυτά κυμαίνεται από 0,1 έως 0,5 % ξηρού βάρους (Tewari et al., 2021). Η περίσσεια P μπορεί να μειώσει ή να εμποδίσει την απορρόφηση άλλων θρεπτικών συστατικών (K, Cu, Fe) (Zeirina et al., 2014). Η έλλειψη φωσφόρου παρεμποδίζει την ανάπτυξη νεαρών φύλλων, προσδίδει στα φύλλα σκουροπράσινο χρωματισμό και μεταβάλλει το σχηματισμό των φύλλων (κακοσχηματισμένα) αλλά συμβάλλει και στην εμφάνιση νεκρωτικών κηλίδων. Παράλληλα, η έλλειψη του μπορεί να αποτυπωθεί και με ερυθρές περιοχές στα γηραιότερα φύλλα. Τέλος, η έλλειψη φωσφόρου οδηγεί σε μειωμένη ανάπτυξη του φυτού (Taiz & Zeiger, 2011).

- Το **ασβέστιο (Ca)** είναι συστατικό των κυτταρικών τοιχωμάτων και μεμβρανών, σχηματίζοντας σύμπλοκα με τις μεμβρανικές πρωτεΐνες και τα φωσφολιπίδια (Αϊβαλάκης et al., 2016). Επιπλέον, χρησιμοποιείται στη μιτωτική άτρακτο για την κυτταρική διαίρεση και επιμήκυνση. Παράλληλα το ασβέστιο συμμετέχει σε μηχανισμούς διαβίβασης σήματος σε αποκρίσεις του φυτού που σχετίζονται με ορμονικά ή περιβαλλοντικά σήματα (White & Broadley, 2003). Η απορρόφηση του μπορεί να επηρεαστεί από χαμηλές θερμοκρασίες, και ακραίες αυξομειώσεις σχετικής υγρασίας κυρίως στα καρποδοτικά φυτά (Adams & Ho, 1993). Στον ξηρό ιστό των φύλλων το ασβέστιο κυμαίνεται από 0,1 έως 2 % (Tewari et al., 2021). Η έλλειψη ασβεστίου προκαλεί νέκρωση των μεριστωματικών περιοχών στο υπέργειο και στο υπόγειο τμήμα του φυτού και σε σημεία όπου ο σχηματισμός κυτταρικού τοιχώματος πραγματοποιείται πιο γρήγορα. Στα νεαρά φύλλα παρατηρείται μία συστροφή των φύλλων προς τα κάτω και στη συνέχεια εμφανίζεται νέκρωση των ιστών στο ακραίο τμήμα των φύλλων (Taiz & Zeiger, 2011). Στο ριζικό σύστημα καταγράφεται απουσία ανάπτυξης πλευρικών ριζών και στους καρπούς τομάτας και πιπεριάς αναπτύσσεται καφέ ξηρός ιστός στο κάτω μέρος των καρπών (Taylor & Locascio, 2004).
- Το **μαγνήσιο (Mg)** παίζει βασικό ρόλο στην ενεργοποίηση ενζύμων που εμπλέκονται στις διαδικασίες της αναπνοής, της φωτοσύνθεσης και στη σύνθεση DNA και RNA. Επίσης, το μαγνήσιο αποτελεί συστατικό της χλωροφύλλης καθώς βρίσκεται στο κέντρο του τετραπυρρολικού δακτυλίου αυτού (Taiz & Zeiger, 2011). Το μαγνήσιο

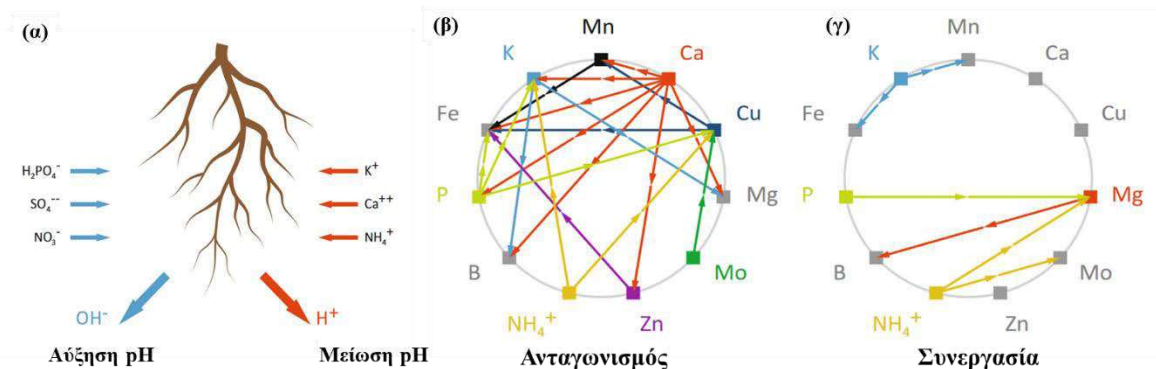
απορροφάται δύσκολα για τιμές pH < 5,5 και σε αυτή την περίπτωση δρα ανταγωνιστικά με την απορρόφηση καλίου. Τα μακροσκοπικά συμπτώματα της ανεπάρκειας είναι η ανάπτυξη χλωρωτικών περιοχών (κιτρίνισμα) μεταξύ των νεύρων των φύλλων και παρατηρούνται στα γηραιότερα φύλλα λόγω της κινητικότητας του. Η συνήθης περιεκτικότητα των φύλλων σε Mg είναι 1,5 – 3,5 g kg⁻¹ (Guo et al., 2016). Η παρατεταμένη έλλειψη μαγνησίου στο φυτό μπορεί να μετατρέψει το χρώμα των φύλλων σε κίτρινο ή ακόμη και λευκό με τα φύλλα να αποκόπτονται πρόωρα από το υπέργειο τμήμα.

- Το **θείο (S)** απαντάται σε αμινοξέα όπως η κυστίνη και η μεθειονίνη αλλά και σε συνένζυμα και βιταμίνες όπως το συνένζυμο A, η βιοτίνη, η βιταμίνη B₁ και το παντοθενικό οξύ, τα οποία είναι απαραίτητα για τον μεταβολισμό (Αϊβαλάκης et al., 2016). Η απορρόφηση του θείου εξαρτάται από τη συγκέντρωση του αζώτου και συγκεκριμένα απορροφάται όταν η αναλογία S:N είναι κοντά 1:10 (McCutchan et al. 2003). Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε θείο στα φυτά είναι 0,1 % του ξηρού του βάρους (Juszczuk & Ostaszewska, 2011). Τα συμπτώματα από την έλλειψη θείου είναι παρόμοια με εκείνα της τροφοπενίας αζώτου, εντούτοις η έλλειψη θείου εμφανίζεται πρώτα σε ώριμα και γηραιότερα φύλλα επειδή το θείο είναι δυσκίνητο θρεπτικό, άρα μεταφέρεται δύσκολα προς τα νεαρά φύλλα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η χλώρωση μπορεί να εμφανιστεί ταυτόχρονα σε όλα τα φύλλα ή πρώτα σε παλαιότερα όπως είναι αναμενόμενο (Taiz & Zeiger, 2011).
- Ο **σίδηρος (Fe)** παίζει σημαντικό ρόλο ως συστατικό των ενζύμων που εμπλέκονται στη μεταφορά ηλεκτρονίων στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, όπως είναι τα κυτοχρώματα. Κατά τη μεταφορά ηλεκτρονίων ο σίδηρος οξειδώνεται από τη δισθενή του μορφή (Fe²⁺) σε τρισθενή μορφή (Fe³⁺). Επίσης, ο σίδηρος εμπλέκεται στις διαδικασίες βιοσύνθεσης της χλωροφύλλης. Ο σίδηρος είναι ένα σημαντικό μικροθρεπτικό συστατικό για τα φυτά, όμως η ανεπάρκεια του στο θρεπτικό διάλυμα αποτελεί αδύναμο σημείο για την ενυδρείοπνία λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης του στο θρεπτικό διάλυμα (Kasozí et al., 2019). Η μέγιστη απορρόφηση πραγματοποιείται σε τιμές pH 5,5 – 6,0 και όταν η αναλογία του με το μαγγάνιο είναι Fe:Mn 2:1 (Sonneveld & Voogt, 2009). Η τροφοπενία σιδήρου έχει αρνητικό αντίκτυπο στη στοματική αγωγιμότητα και μειώνει την φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης φωτοσυνθετικών χρωστικών και ιδιαίτερα χλωροφύλλης a που προκαλείται από την έλλειψη του (Larbi et al., 2006a). Οι χαμηλές

θερμοκρασίες μειώνουν την αποτελεσματικότητα της απορρόφησης και τα συμπτώματα ανεπάρκειας χαρακτηρίζονται από χλώρωση των νεαρών φύλλων μεταξύ των νεύρων και μειωμένη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος (Miller et al., 1995). Όμως, ο σίδηρος εμφανίζει χαμηλή κινητικότητα και δεν είναι εφικτή η μεταφορά του στα νεαρά φύλλα από τα γηραιότερα φύλλα. Η εκτεταμένη τροφοπενία σιδήρου οδηγεί σε αλλαγή του χρώματος των φυτών που μπορεί να γίνει έως λευκό, ανάπτυξη νεκρωτικών κηλίδων και στη συνέχεια σε νέκρωση του φυτικού ιστού (Hashimi et al., 2023).

- Το **νάτριο (Na)** είναι απαραίτητο θρεπτικό για κάποια φυτά C₄, των οποίων ενεργοποιεί την αύξηση, γιατί συντελεί στην επέκταση των κυττάρων, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις, ιδιαίτερα αλόφυτων, μπορεί να υποκαταστήσει το κάλιο ως ένα ωσμωτικό ενεργό διαλυτό συστατικό (Hopkins & Huner, 2020). Η έλλειψη νατρίου οδηγεί σε χλώρωση και νέκρωση των φυτικών ιστών και στην μείωση σχηματισμού ανθέων. Αντίθετα, σε περίσσεια συγκέντρωση μπορεί να προκαλέσει μείωση της παραγωγής σε ορισμένα φυτά λόγω τοξικότητας. Τα όρια που δεν επηρεάζουν την ανάπτυξη είναι τα 30 mM NaCl στον βασιλικό, ενώ για την τομάτα στο στάδιο της καρπώδεσης η απορρόφηση νατρίου βελτιώνει την ποιότητα των καρπών (Germano et al., 2022; Shiyab et al., 2013).
- Το **μαγγάνιο (Mn)** ενεργοποιεί διάφορα ένζυμα στα φυτικά κύτταρα που εμπλέκονται σε βασικές βιοχημικές διεργασίες, μεταξύ άλλων στον κύκλο του Calvin και στη σύνθεση ATP (Αϊβαλάκης et al., 2016). Επιπλέον αποτελεί τμήμα του συμπλόκου της φωτόλυσης του νερού κατά τις φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης, επομένως εμπλέκεται στη φωτοσυνθετική έκλυση οξυγόνου (Hopkins & Huner, 2020). Η έλλειψη Mn αποτυπώνεται με μεσονεύριες χλωρωτικές περιοχές στα νεαρά φύλλα με την ανάπτυξη μικρών κηλίδων και η κρίσιμη συγκέντρωση στο φυτικό ιστό για την αποφυγή αυτού είναι 10 – 20 mg kg⁻¹ ξηρού ιστού (Broadley et al., 2012).
- Η απορρόφηση του **ψευδάργυρου (Zn)** και του **χαλκού (Cu)** επηρεάζεται από το pH του θρεπτικού διαλύματος και η βέλτιστη απορρόφηση πραγματοποιείται στο εύρος 5,5 – 6,5 (Balafrej et al., 2020; Kumar et al., 2021). Οι ελλείψεις ψευδαργύρου εμφανίζονται σπάνια και αντιπροσωπεύονται από χλωρωτικές περιοχές των φύλλων μεταξύ των νευρώνων, μικρά μεσογονάτια διαστήματα και μειωμένη ανάπτυξη. Ο ψευδάργυρος είναι συμπαραγοντας πολλών ενζύμων που εμπλέκονται στο μεταβολισμό των υδατανθράκων, την διατήρηση της ακεραιότητας μεμβρανών κ.α.

Μία από τις κυριότερες όμως δράσεις του αφορούν την εμπλοκή του στον μεταβολισμό της αυξίνης και η έλλειψη του στο φυτό συνεπάγει την ύπαρξη μικρών και παραμορφωμένων φύλλων αλλά και τον σχηματισμό ροζέτας στο υπέργειο τμήμα (Hopkins & Huner, 2020). Επιπλέον η έλλειψη του οδηγεί και σε μειωμένη πρόσληψη σιδήρου διότι αυτά τα δύο θρεπτικά συνεργάζονται για την πρόσληψη του σιδήρου από τη ρίζα (Mousavi et al., 2012) Ο χαλκός σχετίζεται με ένζυμα που εμπλέκονται σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής όπως είναι η πλαστοκυανίνη που συμμετέχει στη μεταφορά ηλεκτρονίων στις φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης (Hopkins & Huner, 2020). Η ανεπάρκεια σε χαλκό αποτυπώνεται αρχικά με σκουροπράσινο χρωματισμό των φύλλων και νεκρωτικές κηλίδες στις κορυφές των νεαρών φύλλων που επεκτείνονται μέχρι τη βάση του και περιφερειακά των φύλλων. Επιπλέον, τα φύλλα είναι δύσμορφα και εμφανίζουν συστροφή, ενώ σε έντονη έλλειψη χαλκού τα φύλλα αποκόπτονται πρόωρα (Mir et al., 2021).



Εικόνα 10. Σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών συστατικών (α) επίδραση στο pH από την πρόσληψη θρεπτικών, (β) ανταγωνιστικές σχέσεις και (γ) συνεργατικές σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών συστατικών (Maucieri et al., 2019).

11. Λειτουργικές αποκρίσεις φυτών

Για την ορθή διαχείριση των συστημάτων ενυδρείοποιίας δεν επαρκεί η παρακολούθηση μόνο των φυσικοχημικών παραμέτρων και ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού. Επιπλέον, οι αναπτυξιακές μετρήσεις των φυτών αν και μας δίνουν μία άμεση εικόνα της κατάστασης τους, δεν είναι ικανές να μας δώσουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την φυσιολογική λειτουργία των φυτών. Σε ένα σύστημα καλλιέργειας όπως η ενυδρείοποιία όπου εμπλέκονται κι άλλοι οργανισμοί (ψάρια και βακτήρια), η παρακολούθηση των λειτουργικών αποκρίσεων των φυτών κρίνεται αναγκαία. Οι αποκρίσεις αυτές μπορούν να αποτυπώσουν πλήρως την λειτουργική κατάσταση των φυτών στις δεδομένες συνθήκες,

αναγνωρίζοντας πιθανές καταπονήσεις, αλλά και τα αδύναμα σημεία του συστήματος. Με βάση αυτές τις πληροφορίες είναι δυνατό να διαγνώσουμε προβλήματα και να εφαρμόσουμε ένα πλαίσιο καλλιεργητικών παρεμβάσεων, ώστε να επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση του συστήματος καλλιέργειας και η απόδοση των φυτών.

Οι περιβαλλοντικές πιέσεις που ασκούνται στην καλλιέργεια των φυτών αποτελούν περιοριστικό παράγοντα της αγροτικής παραγωγικότητας παγκοσμίως. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, η ξηρασία και η έλλειψη θρεπτικών συστατικών όταν οι τιμές τους κυμαίνονται εκτός των βέλτιστων ορίων προκαλούν μεμονωμένα ή συνδυαστικά καταπόνηση (stress) σε μία καλλιέργεια (Zhang et al., 2022). Η κατανόηση των μηχανισμών που ρυθμίζουν τα μορφολογικά - αναπτυξιακά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των φυτών υπό καταπόνηση έχει μεγάλη σημασία να μελετώνται στην αγροτική παραγωγή.

Η καταγραφή της φωτοσύνθεσης ως κορυφαία μεταβολική διεργασία των φυτικών οργανισμών είναι απαραίτητη και πραγματοποιείται με την μέτρηση των ρυθμών αφομοίωσης του CO₂, ενώ παράλληλα καταγράφεται και ο ρυθμός διαπνευστικής απώλειας νερού. Αυτό σήμερα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας σύγχρονους μετρητές – αναλυτές αερίων που άμεσα και με μη επεμβατικές μεθόδους στο φυτό δίνουν πληροφορίες για την ανταλλαγή αερίων και την αγωγιμότητα των στομάτων (Khruschev et al., 2022). Επιπρόσθετα, η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός δίνει πληροφορίες για την απόδοση της φωτοσύνθεσης αναλόγως με την δεδομένη για εκείνη τη στιγμή κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και των ποικίλων περιορισμών που μπορεί να επιβάλλονται από το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή καμπύλης (light respond curves, LCs) καταγράφοντας τόσο α) την φωτοσυνθετική ικανότητα (photosynthetic capacity, A_{max}), δηλαδή την μέγιστη φωτοσύνθεση που μπορεί να επιτευχθεί κατά την δεδομένη χρονική στιγμή, β) την ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (photosynthetic quantum yield, a) που υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης του ευθύγραμμου τμήματος, γ) το σημείο αντιστάθμισης του φωτός και δ) το ρυθμό της μιτοχονδριακής αναπνοής (στο σκοτάδι) (dark respiration, R_d) (Markos & Kyparissis, 2011).

Προκειμένου να εκτιμηθεί εάν το φυτό υφίσταται καταπόνηση, ένα πολύτιμο εργαλείο είναι η μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo* που αποτυπώνει τη λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής και τις επιπτώσεις πιθανών καταπονήσεων σε αυτή (Murchie & Lawson, 2013). Τα δεδομένα λαμβάνονται μέσω μη επεμβατικών μετρήσεων με φθορισμόμετρα με αποτέλεσμα να μπορεί να καταγραφεί άμεσα μία σειρά από παραμέτρους που σχετίζονται με την οξειδοαναγωγική κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και τις

αποδόσεις και ροές ενέργειας των φωτεινών αντιδράσεων (Padhi et al., 2021). Επιπλέον, λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες κυρίως για τα γεγονότα που συμβαίνουν στο PSII (Strasser et al., 2004), όπως για παράδειγμα η αναγωγή της Q_A δηλαδή του πρώτου σταθερού δέκτη ηλεκτρονίων του PSII ή πληροφορίες για την αναγωγή των ενδιάμεσων φορέων e^- και τα αποθέματα της πλαστοκινόνης (PQ) (Tóth et al., 2007). Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα να εκτιμηθεί η κατάσταση της αναγωγικής πλευράς του PSI (Strasser et al., 2000).

Ένας ακόμη σημαντικός μηχανισμός που δίνει πληροφορίες για την ανάγκη φωτοπροστασίας του φυτού και για τη μη φωτοχημική απόσβεση ενέργειας είναι η λειτουργία του κύκλου των ξανθοφυλλών. Ο δείκτης ανακλαστικότητας του φύλλου PRI (Photochemical Reflectance Index) έχει βρεθεί ότι συσχετίζεται με την λειτουργία του κύκλου και τις αλληλομετατροπές μεταξύ ζεαξανθίνης και ανθεραξανθίνης (Wang et al., 2020; Weng et al., 2006). Οι διακυμάνσεις του PRI σχετίζονται άμεσα με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (Light Use Efficiency – LUE) για φύλλα που εκτίθενται σε συνθήκες σχετικά σταθερών εντάσεων φωτός (Vanikiotis et al., 2021), αλλά όχι σε μεταβαλλόμενες συνθήκες όπως για παράδειγμα ανατολή ή δύση του ήλιου (Sukhova & Sukhov, 2019). Επιπλέον, ο δείκτης ανακλαστικότητας PRI σχετίζεται με την αναλογία καροτενοειδή/χλωροφύλλη στα πράσινα φύλλα (Sukhova & Sukhov, 2018). Με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτό πως το PRI αποτυπώνει μεταβολές και καταπονήσεις που δέχεται ένα φυτό όπως η υπερβολική έκθεση στο φως, η ξηρασία, οι υψηλές θερμοκρασίες και η αυξημένη αλατότητα, που συνοδεύονται από μειωμένη αφομοίωση του CO_2 , μειωμένη ανά φωτόνιο απόδοση του PSII καθώς και με αύξηση της μη φωτοχημικής απόσβεσης της περίσσειας ενέργειας (NPQ) (Yudina et al., 2020). Με αυτό τον τρόπο η μέθοδος μπορεί να αποκαλύψει βραχυπρόθεσμες αλλαγές στην κατάσταση αποεποξείδωσης, δηλαδή την διαδικασία μετατροπής της ξανθοφύλλης, αλλά και να παρακολουθήσει επίσης μακροπρόθεσμες αλλαγές στην αναλογία καροτενοειδών – χλωροφύλλης (Sukhova & Sukhov, 2020).

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν ορισμένα από τα θεραπευτικά συστατικά και η αναγκαιότητα τους για το φυτικό σώμα. Η έλλειψη θρεπτικών συστατικών είναι καθοριστική για τη λειτουργία του φυτού και κατ' επέκταση για την ανάπτυξη του. Οι τροφοπενίες επηρεάζουν διάφορες φυσιολογικές και μεταβολικές διεργασίες με αποτέλεσμα να παράγονται ενεργές μορφές οξυγόνου (Reactive Oxygen Species, ROS) και να προκαλείται οξειδωτική καταπόνηση από την συσσώρευσή τους. Για να αντιμετωπίσουν αυτού του είδους την καταπόνηση τα φυτά ενεργοποιούν ενζυμικά και μη ενζυμικά αντιοξειδωτικά συστήματα για την προστασία των κυττάρων τους έναντι των επιβλαβών ROS (Tewari et al., 2021). Επομένως, είναι σημαντικό να μελετάται το αντιοξειδωτικό δυναμικό των φυτών για την

παροχή πληροφοριών που σχετίζονται με την αντιοξειδωτική δραστηριότητα. Οι αντιοξειδωτικές ενώσεις λειτουργούν με στόχο την καταστροφή ή/και αποτοξικοποίηση των ROS και οι περισσότερο διαδεδομένες αντιοξειδωτικές ενώσεις στους φυτικούς ιστούς είναι οι υδατοδιαλυτές ασκορβικό οξύ (βιταμίνη C) και ανηγμένη γλουταθειόνη και οι λιποδιαλυτές α-τοκοφερόλη (βιταμίνη E) και β-καροτένιο (βιταμίνη A). Συγκεκριμένα το ασκορβικό οξύ είναι ένα μόριο που συμμετέχει σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και στην άμυνα των φυτών (Taiz & Zeiger, 2011).

12. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετά τα συστήματα ενυδρειοπονίας για πρώτη φορά στην Ελλάδα, μέσα από μία σειρά πειραμάτων για την καλλιέργεια λαχανικών, αρωματικών φυτών και Μεσογειακών αυτοφυών φυτών με παράλληλη εκτροφή κόκκινης τιλάπιας. Ο σκοπός είναι η παρακολούθηση της δυναμικής των καλλιεργειών σε συστήματα ενυδρειοπονίας και η αναγνώριση των αδύναμων σημείων των συστημάτων, μέσω της εκτεταμένης μελέτης της ανάπτυξης, φυσιολογίας, καταπόνησης, θρέψης και βιοχημικών παραμέτρων των φυτών. Μέχρι τώρα η διεθνής βιβλιογραφία περιορίζεται σε αναφορές που σχετίζονται με την ανάπτυξη και την απόδοση φυτών που καλλιεργούνται σε συστήματα ενυδρειοπονίας, ενώ σχεδόν απουσιάζουν μελέτες που καταγράφουν πτυχές της φυσιολογίας των φυτών και της πιθανής καταπόνησης τους από τους περιορισμούς του συστήματος. Η παρούσα διδακτορική διατριβή καλύπτει αυτό το διεθνές ερευνητικό κενό μέσα από πειράματα θρέψης των φυτών που προκύπτουν από απευθείας λίπανση στο θρεπτικό διάλυμα αλλά και μέσα από τη διαδικασία μεταβολισμού των ψαριών με διατροφικά πειράματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΦΥΤΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

1. Εισαγωγή

Η μόνη πηγή θρεπτικών συστατικών για τα φυτά στη συζευγμένη ενυδραιοπονία προέρχεται από την τροφή και τις μεταβολικές διεργασίες των ψαριών. Σύμφωνα με τον (FAO, 2014), το 60-70% των ιχθυοτροφών απελευθερώνεται τελικά από τα ψάρια στο νερό μέσω των κοπράνων και της αμμωνίας. Επιπλέον, υπολογίζεται ότι το 5% της προσφερόμενης ιχθυοτροφής δεν καταναλώνεται και στη συνέχεια διαλυτοποιείται στο νερό (Robaina et al., 2019). Αρκετές μελέτες επιχειρούν να αναλύσουν το πολύπλευρο ζήτημα των θρεπτικών συστατικών στο ενυδραιοπονικό σύστημα, όσον αφορά τα ποσοστά ανάκτησης τους (Kloas et al., 2015), την επίδραση του pH του συστήματος στη διαθεσιμότητά τους (Anderson et al., 2017) και τη βελτιστοποίηση της ιχθυοκαλλιέργειας ώστε να απελευθερώνονται επαρκείς ποσότητες θρεπτικών για την μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Andriani et al., 2017). Με βάση αντίστοιχες εκτιμήσεις, οι Endut et al., (2010) υπολόγισαν το εύρος της ποσότητας ιχθυοτροφής, που θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες των φυλλωδών λαχανικών στα $15\text{--}42\text{ g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$.

Η ενυδραιοπονία είναι εκ κατασκευής και φιλοσοφίας ένα ευέλικτο σύστημα όσον αφορά τις συνθήκες εκτροφής ψαριών, τον τύπο και τον ρυθμό σίτισης των ψαριών, την ρύθμιση των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού. Εντούτοις, παρά τους διαφορετικούς πιθανούς τρόπους διαχείρισης, στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής της ενυδραιοπονίας παρατηρούνται ελλείψεις ορισμένων θρεπτικών συστατικών (Nichols & Savidon, 2012). Καταρχάς, η έλλειψη ή οι ανεπαρκείς ποσότητες απαραίτητων θρεπτικών συστατικών για τα φυτά στις εμπορικές ιχθυοτροφές συνεπάγεται μειωμένη διαθεσιμότητα των συγκεκριμένων στοιχείων στις καλλιέργειες μειώνοντας την παραγωγικότητα και την ποιότητα τους (Graber & Junge, 2009; Rafiee et al., 2019). Το κάλιο (K), ο σίδηρος (Fe) και το ασβέστιο (Ca) είναι τα πιο κοινά θρεπτικά που βρίσκονται σε επίπεδα κάτω από τα βέλτιστα στα συστήματα ενυδραιοπονίας (Rakocy, 2012). Το K είναι ένα λειτουργικό μακροθρεπτικό συστατικό που επηρεάζει τη φωτοσύνθεση, τη σύνθεση πρωτεϊνών και το ωσμωτικό δυναμικό, ενώ είναι ζωτικής σημασίας για τη ρύθμιση της στοματικής αγωγιμότητας (Roosta, 2014b). Παράλληλα, η έλλειψη σιδήρου αντανακλάται σε διάφορες βιοχημικές και φυσιολογικές διεργασίες του φυτού, καθώς αποτελεί σημαντικό συστατικό των μοριακών συμπλεγμάτων που εμπλέκονται

στη φωτοσυνθετική αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων και είναι ένας συμπαράγοντας πολλών ενζύμων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που εμπλέκονται στη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης (chl) (Kasozzi et al., 2019; Molassiotis et al., 2006). Αυτά τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά παίζουν σημαντικό ρόλο στο μεταβολισμό των φυτών και στην φυσιολογική λειτουργία του φωτοσυνθετικού συστήματος. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητα για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της καλλιέργειας και της ποιότητας του τελικού προϊόντος (John et al., 2022). Πολλές μελέτες της τελευταίας δεκαετίας αντιμετώπισαν τις επιβαλλόμενες από το σύστημα ελλείψεις θρεπτικών με εκτεταμένη προσθήκη μιας σειράς μακρο- και μικροθρεπτικών στοιχείων μέσω λιπασμάτων για την επίτευξη στόχων συγκέντρωσης που έχουν τεθεί για καλλιέργειες εκτός έδαφος (Delaide et al., 2016; Nicoletto et al., 2018). Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση αποτελεί μια ισχυρή παρέμβαση στην ανάκτηση θρεπτικών που κυκλοφορούν στο νερό, διαταράσσοντας δυνητικά την ισορροπία μεταξύ των υποσυστημάτων φυτών – ψαριών - βακτηρίων. Σημαντικές είναι οι πιθανές αρνητικές συνέπειες στη λειτουργία και τη βιωσιμότητα της συμβίωσης, αλλά και την ευζωία των ψαριών. Επομένως, βραχυ- ή/και μακροπρόθεσμα αυτές οι χημικές προσθήκες υπονομεύουν το κύριο πλεονέκτημα της ενυδρειοπονίας, δηλαδή την αειφορία και το χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Μία εναλλακτική προσέγγιση για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μειωμένης διαθεσιμότητας συγκεκριμένων θρεπτικών με ταυτόχρονη όμως διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος θα μπορούσε να είναι ένα σχήμα ελάχιστων (minimum) αλλά αποτελεσματικών προσθηκών θρεπτικών συστατικών στο σύστημα. Η εύρεση και η τελειοποίηση του κατάλληλου συνδυασμού θρεπτικών συστατικών και του ρυθμού εφαρμογής τους είναι σίγουρα ένα πολύπλευρο ζήτημα που εξαρτάται από τα εμπλεκόμενα είδη ψαριών και φυτών, την πυκνότητα τους και τις φυσικοχημικές παραμέτρους του συστήματος. Επομένως, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης «ελάχιστων δυνατών εισροών» απαιτούν μια λεπτομερή μελέτη των λειτουργικών αποκρίσεων των φυτών και ψαριών σε αυτήν κάτω από τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όσον αφορά τα φυτά, η βιβλιογραφία της ενυδρειοπονικής έρευνας περιορίζεται κυρίως στην αξιολόγηση της ανάπτυξης και της απόδοσης (Buzby et al., 2016; Ru et al., 2017). Παρότι οι τελευταίες είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο του παραγωγικού δυναμικού μιας καλλιέργειας, από μόνες τους είναι ανεπαρκείς για να περιγράψουν την συνολική απόδοση του συστήματος όταν αλλάζουν πολλές μεταβλητές. Αντίθετα, η μελέτη των λειτουργικών αποκρίσεων των φυτών θα μπορούσε να αντιμετωπίσει τα ζητήματα που περιγράφηκαν παραπάνω εντοπίζοντας τα αδύναμα σημεία και περιορισμούς του συστήματος, αλλά και υποδεικνύοντας πιθανές πρακτικές διαχείρισης.

Η ενυδρειοπονία έχει μελετηθεί αρκετά ως προς την καλλιέργεια ειδών υψηλής εμπορικής αξίας, όπως το μαρούλι και το σπανάκι αλλά και καρποδοτικών φυτών όπως η τομάτα και το αγγούρι καθώς καταναλώνονται ευρέως (Castillo-Castellanos et al., 2016; Geisenhoff et al., 2016; Lynn et al., 2022). Συγκεκριμένα το μαρούλι είναι το πιο διαδεδομένο φυτικό είδος στην ενυδρειοπονία, με κύριο πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνται μεγάλες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών για την καλλιέργεια του (Lenz et al., 2021). Αντίθετα το σπανάκι είναι ένα περισσότερο απαιτητικό φυτό, κυρίως σε συγκεντρώσεις σιδήρου, καλίου και ασβεστίου (Diver & Rinehart, 2006), παρότι ανήκει στην κατηγορία των φυλλωδών λαχανικών που θεωρείται ότι έχουν λιγότερες απαιτήσεις συγκριτικά με καρποδοτικά λαχανικά (Roosta & Hamidpour, 2011).

Σε αντίθεση με τα ευρέως καλλιεργούμενα λαχανικά, η ενυδρειοπονία δεν έχει δοκιμαστεί έως τώρα για την καλλιέργεια βρώσιμων αυτοφυών φυτικών ειδών. Ωστόσο, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την καλλιέργεια αυτών των ειδών, κυρίως λόγω των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους που φέρουν και ισχυρισμούς υγείας, δηλαδή έχει αποδειχθεί ότι με διάφορους τρόπους προωθούν την ανθρώπινη υγεία και ευζωία (Krigas et al., 2021). Η ενυδρειοπονία θα μπορούσε να είναι μια αποτελεσματική καλλιεργητική τεχνική που θα λειτουργήσει και ως εναλλακτική της τρέχουσας γεωργικής πρακτικής. Σύμφωνα με την τελευταία, η καλλιέργεια αυτοφυών (άγριων) φυτών αντιμετωπίζεται με τα ίδια σχήματα λίπανσης και συνολικής διαχείρισης που ισχύουν για την εντατική καλλιέργεια λαχανικών. Αυτό στηρίζεται τόσο στην εδραιωμένη αντίληψη των αγροτών για υπερβολική χρήση λιπασμάτων, όσο και στην απουσία πληροφορίας και πρωτοκόλλων για νέο-εισαχθέντα είδη στην αγροτική παραγωγή. Το τελικό αποτέλεσμα είναι οι αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του προϊόντος, καθώς και η υποβάθμιση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων (Korittke et al., 2019). Κυρίως όμως η τρέχουσα προσέγγιση δεν σέβεται τον ολιγοτροφικό χαρακτήρα των αυτοφυών φυτών. Με βάση τα παραπάνω, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν τυποποιημένα και βιώσιμα πρωτόκολλα για την καλλιέργεια τέτοιων ειδών (Fanourakis et al., 2022).

Το *Cichorium spinosum* L., το γνωστό σταμναγκάθι, είναι ένα βρώσιμο αυτοφύες είδος που ευδοκίμει στους παράκτιους και ορεινούς οικοτόπους της λεκάνης της Μεσογείου. Η εξαιρετική του γεύση και η υψηλή αφθονία του το κατέστησαν βασικό συστατικό της μεσογειακής διατροφής και πιο συγκεκριμένα της περίφημης κρητικής διατροφής (Psaroudaki et al., 2012). Η θρεπτική του ανάλυση έχει δείξει ότι είναι πλούσιο σε αντιοξειδωτικές ενώσεις, βιταμίνες (C και K1) και μέταλλα (Petrooulos et al., 2016). Όλα τα παραπάνω οφέλη κατατάσσουν το σταμναγκάθι στην ομάδα τροφίμων με υψηλή διατροφική αξία προωθώντας την εμπορική καλλιέργειά του. Έτσι, το σταμναγκάθι εισήχθη πρόσφατα ως εναλλακτική

καλλιέργεια λαχανικών, οδηγώντας στην ανάγκη δημιουργίας ενός καλλιεργητικού πρωτοκόλλου. Οι μέχρι στιγμής σχετικές ερευνητικές προσπάθειες είχαν στόχο την μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η βιωσιμότητα της καλλιέργειας σε ότι αφορά τη χρήση λιπασμάτων και νερού (Chatzigianni et al., 2019; Petropoulos et al., 2018). Εντούτοις, τα αυτοφυή φυτά, ιδιαίτερα αυτά που προέρχονται από μεσογειακά οικοσυστήματα είναι ολιγοτροφικά και ολόκληρη η λειτουργία και απόδοσή τους βασίζεται σε αυτό το χαρακτηριστικό. Σημαντικό να τονιστεί εδώ είναι ότι οι χαμηλές εισροές στα αγροτικά συστήματα είναι ένα κομβικό χαρακτηριστικό και απαίτηση της επικρατούσας αντίληψης για τη βιώσιμη γεωργία.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η διεξοδική αξιολόγηση της απόδοσης ενός ενυδρειοπονικού συστήματος εργαστηριακής κλίμακας, όσον αφορά τα φυσιολογικά, βιοχημικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών και την ανάπτυξη των ψαριών όταν εφαρμόζεται η προσέγγιση των «ελάχιστων δυνατών εισροών». Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη των αποκρίσεων σε διαφορετικά σχήματα λίπανσης: α) μόνο με σίδηρο, β) σιδήρου συνδυαστικά με κάλιο, και γ) μη προσθήκη επιπλέον θρεπτικών, με την τελευταία μεταχείριση να λειτουργεί ως ο μάρτυρας (Control) των αντίστοιχων πειραμάτων. Τα φυτά που μελετήθηκαν σε αυτές τις συνθήκες ήταν το μαρούλι (*Lactuca sativa* var. *Romana*), το σπανάκι (*Spinacia oleracea* var. *Virofly*) και το σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum*) και συγκαλλιεργήθηκαν με κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis* sp.). Σε μια προσπάθεια να εντοπιστούν τα αδύναμα σημεία του συστήματος και η χρονική πορεία της εμφάνισής τους, παρακολούθηθηκαν καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο η φωτοσυνθετική απόδοση, κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής, δείκτες καταπόνησης, αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός, περιεκτικότητα σε φωτοσυνθετικές χρωστικές και η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών. Κατά την τελική συλλογή πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις της θρεπτικής κατάστασης των φύλλων και μετρήσεις αναπτυξιακών χαρακτηριστικών των φυτών, καθώς και της ανάπτυξης των ψαριών. Επίσης, κατά την πειραματική περίοδο γινόταν τακτική καταγραφή των παραμέτρων ποιότητας του νερού.

Είναι η πρώτη φορά που παρουσιάζεται μία συνθετική και ολοκληρωμένη εικόνα των λειτουργικών και αναπτυξιακών αποκρίσεων των φυτών, αλλά και της απόδοσης ολόκληρου του συστήματος ενυδρειοπονίας, καλύπτοντας το αντίστοιχο κενό στη σχετική βιβλιογραφία. Μέσω της προσέγγισης των «ελάχιστων δυνατών εισροών» επιχειρήθηκε ο εντοπισμός των αδύναμων σημείων του ενυδρειοπονικού συστήματος προκειμένου να αξιολογηθεί η καταλληλότητα και η αποτελεσματικότητά του για την καλλιέργεια των τριών μελετούμενων ειδών και να προταθούν μέτρα βελτιστοποίησης.

2. Καλλιέργεια μαρουλιού

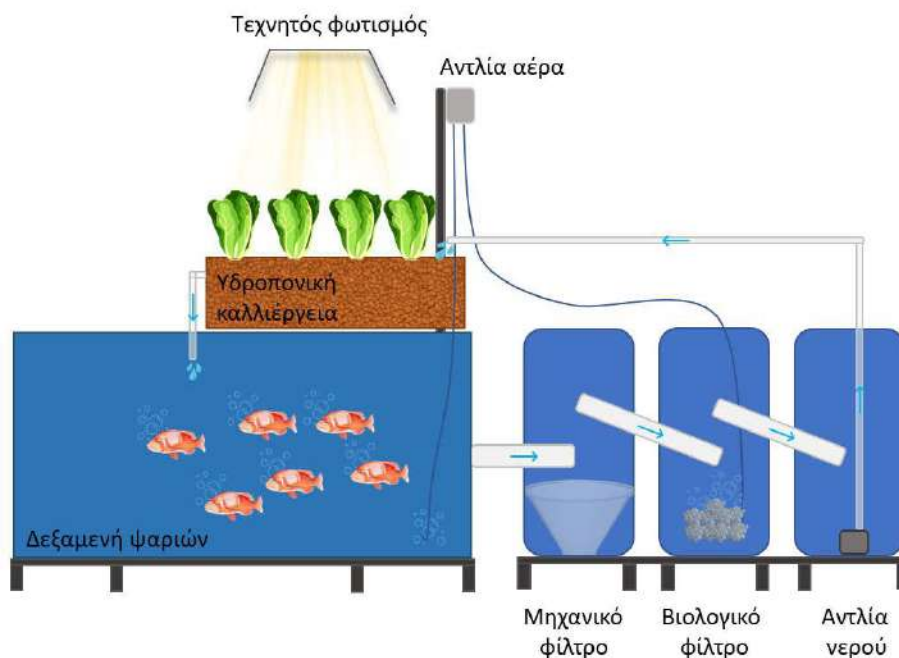
2.1. Υλικά και μέθοδοι

2.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υδατοκαλλιεργειών-Χώρος Ενυδρειοπονίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το εργαστήριο λειτουργούσε σε πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον, με εξοπλισμό ελέγχου του κλίματος (Opticlimat, μοντέλο 15.000 PRO3&PRO4) που μετρούσε και ρύθμιζε συνεχώς τη θερμοκρασία δωματίου στους $20,9 \pm 0,15^{\circ}\text{C}$ και τη σχετική υγρασία στο $59,4 \pm 0,5\%$ καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Χρησιμοποιήθηκαν εννέα αυτόνομα συζευγμένα (κλειστού τύπου) συστήματα εργαστηριακής κλίμακας (Εικόνα 11, περιγράφονται στο 2.1.2) για τη συγκαλλιέργεια μαρουλιού και κόκκινης τιλάπιας με τρεις μεταχειρίσεις (τρία ενυδρειοπονικά συστήματα ανά μεταχείριση):

- (α) Control (Μάρτυρας), ενυδρειοπονικό διάλυμα χωρίς προσθήκη θρεπτικών συστατικών,
- (β) Fe, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου χορηγήθηκε συμπλήρωμα σιδήρου,
- (γ) Fe+K, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου προστέθηκαν σίδηρος και κάλιο.

Ο σίδηρος συμπληρώθηκε με χηλική μορφή Fe-DTPA (GEOLIX EPE, Chelated Iron DTPA 11%) με συγκέντρωση στόχο στο θρεπτικό διάλυμα τα $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ και το κάλιο ως θειικό κάλιο (K_2SO_4 , HONEYWELL FLUKA) στα 10 mmol L^{-1} , ακολουθώντας τους αντίστοιχους στόχους που χρησιμοποιούνται για την υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού (Sonneveld & Straver, 1994). Η αρχική προσθήκη θρεπτικών συστατικών πραγματοποιήθηκε πέντε ημέρες μετά την έναρξη του πειράματος, προκειμένου να επιτραπεί μια περίοδος προσαρμογής των φυτών στο σύστημα πριν από την εφαρμογή των μεταχειρίσεων, ώστε να ξεπεραστεί η πιθανή καταπόνηση από την διαδικασία της μεταφύτευσης. Η διακύμανση των επιπέδων σιδήρου και καλίου ήταν υπό συνεχή παρακολούθηση μία φορά την εβδομάδα στο σημείο εισόδου νερού των υδροπονικών μονάδων. Το αντίστοιχο δείγμα νερού διηθούνταν με φίλτρα (διάμετρος πόρου $0,7 \mu\text{m}$) και η μέτρηση πραγματοποιούνταν άμεσα. Οι συγκεντρώσεις σιδήρου προσδιορίζονταν φωτομετρικά (HACH, DR3900) με αντιδραστήρια σιδήρου (HACH, Iron TPTZ Method 8112) ενώ το κάλιο με φλογοφωτόμετρο (JENWAY, PFP7 Flame Photometer) ακολουθώντας τις αντίστοιχες πρότυπες καμπύλες καλίου. Μετά τον υπολογισμό των ελλειμματικών συγκεντρώσεων, τα αντίστοιχα λιπάσματα σιδήρου και καλίου χορηγούνταν στο σύστημα μετά την διάλυση τους σε μη χλωριωμένο νερό, ενώ η προσθήκη τους πραγματοποιούνταν στην δεξαμενή της αντλίας νερού των συστημάτων.



Εικόνα 11. Σχηματική όψη ενός συστήματος ενδρειοπονίας σε εργαστηριακή κλίμακα, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Τα βέλη δείχνουν τη ροή του νερού μέσα στο σύστημα.

2.1.2. Συστήματα ενδρειοπονίας

Κάθε σύστημα (630 L συνολικός όγκος νερού) αποτελούνταν από μια δεξαμενή εκτροφής ψαριών 400 L και μια υδροπονική μονάδα καλλιέργειας φυτών (εμβαδού 1 m² και βάθους 20 cm) χωρητικότητας 50 L νερού, η οποία γεμίστηκε με υπόστρωμα αργίλου (8–16 mm). Το νερό έρεε από τη δεξαμενή των ψαριών στη δεξαμενή των φυτών μέσω ενός συστήματος διαδοχικών φίλτρων, δηλαδή μηχανικό, βιολογικό και φίλτρο αντλίας, τοποθετημένων σε τρία διασυνδεδεμένα δοχεία συνολικού όγκου 180 L (Εικόνα 11). Το μηχανικό φίλτρο αποτελούνταν από στρώματα ναλοβάμβακα (ύψος 10 cm) και σφουγγαριών (EHEIM FIX) για να συγκρατεί τα στερεά απόβλητα ψαριών. Το βιολογικό φίλτρο αποτελούνταν από 10 L κυλινδρικό υπόστρωμα K1 Kaldness media (11 mm) αποικισμένο από νιτροποιητικά βακτήρια (PRODIBIO, Biodigest) για τη διαδικασία νιτροποίησης. Η προετοιμασία του βιολογικού φίλτρου πριν από το πείραμα διήρκεσε ένα μήνα στο τέλος του οποίου επιτεύχθηκε αποτελεσματική οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα. Μια αντλία (HAILEA-hx-8830, 45 W, 2900 L h⁻¹, h_{max} 2,3 m) τοποθετήθηκε στο τρίτο δοχείο για να εξασφαλιστεί η συνεχής ροή φιλτραρισμένου νερού (Q=306 L h⁻¹) προς την υδροπονική καλλιέργεια. Στην υδροπονική κλίση τοποθετήθηκε ένα σιφόνι τύπου bell για τη διαδικασία πλήρωσης/αποστράγγισης, παρέχοντας αερισμό στις ρίζες των φυτών. Ο αερισμός στις δεξαμενές των ψαριών και των βιολογικών φίλτρων υποστηρίχθηκε από αντλίες αέρα

(HAILEA, ACO328, 70 L min⁻¹), που διατηρούσε το διαλυμένο οξυγόνο (DO) στα 8 mg L⁻¹. Η θερμοκρασία του νερού παρέμεινε σταθερή σε όλα τα συστήματα κατά τη διάρκεια του πειράματος στους 23 °C με θερμαντήρες (AQUAEL, Comfort Zone Gold, 300 W).

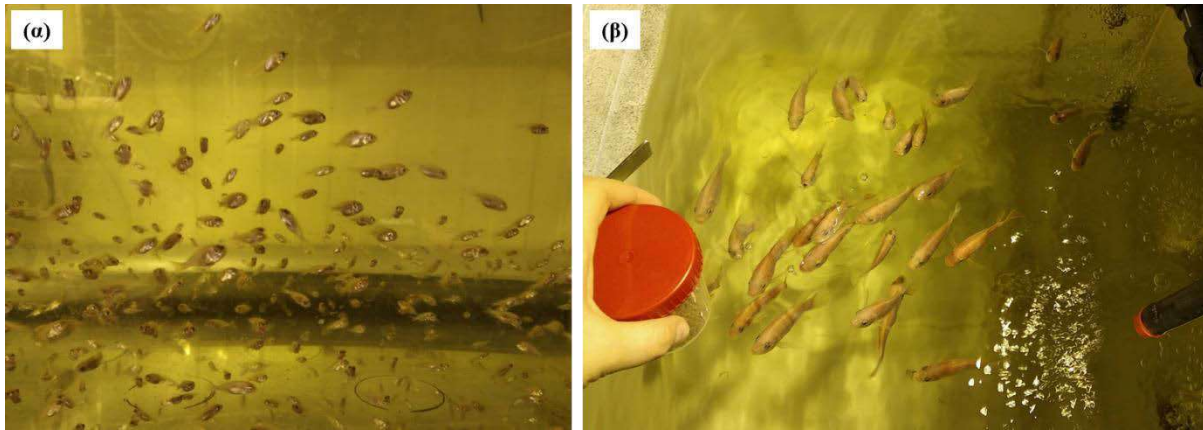
2.1.3. Θρεπτικό διάλυμα

Το pH παρακολουθούνταν καθημερινά, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC, μS cm⁻¹) και το διαλυμένο οξυγόνο (DO, mg L⁻¹) καταγράφονταν τρεις φορές την εβδομάδα. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν στη μέση των δεξαμενών των ψαριών με αισθητήρες για το pH και το DO (HACH, HQ40d) και με ένα φορητό μετρητή για την EC (CRISON, CM35).

Η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών στο νερό μετρούνταν σε εβδομαδιαία βάση χρησιμοποιώντας το ίδιο δείγμα νερού για τον προσδιορισμό Fe και K όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Οι συγκεντρώσεις των ακόλουθων θρεπτικών προσδιορίζονταν φωτομετρικά (HACH, DR3900) με προ ζυγισμένα αντιδραστήρια σε μορφή σκόνης: NH₃ (Salicylate Method, 8155), NO₂⁻ (USEPA Diazotization Method, 8507) NO₃⁻ (Cadmium Reduction Method, 8039) PO₄³⁻ (USEPA PhosVer 3, Ascorbic Acid Method, 8048) και SO₄²⁻ (USEPA, SulfaVer 4 Method, 8051). Μετρούνταν, επίσης, οι συγκεντρώσεις του ασβεστίου (Ca²⁺) και του νατρίου (Na) με φλογοφωτόμετρο (JENWAY, PFP7 Flame Photometer) και τη χρήση αντίστοιχων πρότυπων καμπυλών.

2.1.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις

Οι κόκκινες τιλάπιες (*Oreochromis spp.*) αναπαράχθηκαν και εκτράφηκαν για έξι μήνες πριν από το πείραμα στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου ενυδρείοπονίας (Εικόνα 12). Όλες οι αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες διεξήχθησαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Οδηγίας 2010/63/EE της ΕΕ σχετικά με την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς, υπό την επιτήρηση επιστημόνων με πιστοποιητικό FELASA. Πριν από την έναρξη του πειράματος, συνολικά 270 ψάρια εγκλιματίστηκαν για 15 ημέρες στις δεξαμενές του συστήματος. Μετά από αυτή την περίοδο, τα ψάρια ζυγίστηκαν και κατανεμήθηκαν εξίσου στα εννέα συστήματα. Ο αριθμός των ψαριών ανά σύστημα προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση της φέρουσας ικανότητας ενός ενυδρείου που προτάθηκε από τον (Hirayama, 1974). Η φέρουσα ικανότητα προκύπτει από τους ρυθμούς ρύπανσης και την οξειδωτική ικανότητα σε κλειστά συστήματα καλλιέργειας ή σε ενυδρεία. Για να υπολογιστεί ο ακριβής αριθμός των ψαριών, υπολογίστηκε η οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου και το φορτίο ρύπανσης.



Εικόνα 12. Εκτροφή κόκκινης τιλάπιας στο εργαστήριο ενυδρειοπονίας για τις ανάγκες των πειραμάτων: (α) κόκκινη τιλάπια στο στάδιο της λάρβας σε ενυδρείο αναπαραγωγής, (β) προσέλευση ιχθυδίων για σίτιση κατά την πειραματική διαδικασία στα συστήματα ενυδρειοπονίας.

Σε κάθε σύστημα εισήχθησαν τριάντα κόκκινες τιλάπιες, με αρχικό σωματικό βάρος $16,03 \pm 0,36$ g και μήκος $9,95 \pm 0,08$ cm ($1,2$ kg m⁻³). Η θερμοκρασία του νερού διατηρήθηκε στους 23 °C και το DO στα 8 mg L⁻¹, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.3 και η φωτοπερίοδος ορίστηκε σε 10 ώρες φως :14 ώρες σκοτάδι. Τα ψάρια τρέφονταν μέχρι κορεσμό έξι ημέρες την εβδομάδα και δύο φορές την ημέρα (10:00 και 16:00) με εμπορική τροφή 2 mm, η οποία περιείχε 47,5% πρωτεΐνη, 6,5% λίπος, 2,0% ινώδης ουσίες και 6,0% υγρασία (Tetra, Tetra discus granules). Η ποσότητα της τροφής που καταναλώθηκε προσδιορίστηκε με ζύγιση πριν και μετά τα καθημερινά γεύματα (g day⁻¹). Τα κόπρανα απομακρύνονταν καθημερινά από τις δεξαμενές ψαριών με σιφονισμό και το υλικό του μηχανικού φίλτρου καθαριζόταν τρεις φορές την εβδομάδα με νερό βρύσης. Στο τέλος του πειράματος τα ψάρια ζυγίστηκαν ξανά και καταγράφηκε η τελική βιομάζα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα ψάρια αναισθητοποιήθηκαν με μεθανοσουλφονική τρικαΐνη (MS 222, 5 mg L⁻¹). Οι αναπτυξιακές παράμετροι των ψαριών εκτιμήθηκαν με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Ποσοστό επιβίωσης, S (\%)} = (\text{Τελικός αριθμός ψαριών} / \text{Αρχικός αριθμός ψαριών}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Αύξηση βάρους, WG (g)} = \text{Τελικό βάρος} - \text{Αρχικό βάρος} \quad (2)$$

$$\text{Ειδικός ρυθμός αύξησης, SGR (\% day}^{-1}\text{)} = ((\ln \text{ Τελικό βάρος} - \ln \text{ Αρχικό βάρος}) / \text{Χρόνος}) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Συντελεστής μετατρεψιμότητας τροφής, FCR} = \text{Καταναλωθείσα τροφή (g)} / \text{Αύξηση βάρους (g)} \quad (4)$$

2.1.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών

Οι σπόροι μαρουλιού φυτεύτηκαν σε σπορεία που περιείχαν χώμα και περλίτη (1:1, v/v) και τοποθετήθηκαν σε θερμοκήπιο. Στο στάδιο των έξι αληθινών φύλλων, τα σπορόφυτα μεταφέρθηκαν στον εργαστηριακό χώρο για έναν τριήμερο εγκλιματισμό πριν την τοποθέτησή τους στα συστήματα ενυδρειοπονίας. Συνολικά 72 όμοια φυτά ως προς το ύψος, τον αριθμό

φύλλων και το σχήμα τους επιλέχθηκαν και κατανεμήθηκαν τυχαία στα συστήματα. Πριν από τη μεταφύτευση, οι ρίζες ξεπλύθηκαν προσεκτικά με νερό βρύσης για την απομάκρυνση του εδάφους, χωρίς τον τραυματισμό του ριζικού συστήματος. Οκτώ φυτά τοποθετήθηκαν σε κάθε ενυδρειοπονική καλλιέργεια (24 φυτά ανά μεταχείριση), σε απόσταση 20 cm μεταξύ τους. Τα φυτά αναπτύχθηκαν υπό τεχνητό φωτισμό λαμπτήρων HPS 600 W (Feilo Sylvania Europe Limited, UK) που τοποθετήθηκαν πάνω από κάθε υδροπονική κλίνη. Κατά την τοποθέτηση των φυτών δόθηκε προσοχή στις θέσεις φύτευσης για να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του φωτεινού πεδίου. Η ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας κυμαινόταν από 350–450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (μετρητής PPFD, Skye Instruments Ltd., UK) και η φωτοπερίοδος ορίστηκε σε 10 φως:14 σκοτάδι και ελεγχόταν από έναν χρονοδιακόπτη. Σε όλες τις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος τα φυτά μαρουλιού λάμβαναν δύο φορές την εβδομάδα διαφυλλική εφαρμογή ασβεστίου (LASTING, Lasting Ca) (1 mL m^{-2}) για την αποφυγή τροφοπενίας του συγκεκριμένου θρεπτικού συστατικού.

2.1.6. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών

Έπειτα από το διάστημα των 45 ημερών της καλλιέργειας και στην τελική συγκομιδή των φυτών μετρήθηκαν ο αριθμός των φύλλων και το νωπό βάρος τους. Επίσης, η επιφάνεια των φύλλων (cm^2) υπολογίστηκε από φωτογραφίες με τη χρήση προγράμματος ανάλυσης εικόνας (ImageJ, λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ImageJ.net/version. ImageJ 1.51j, ΗΠΑ). Το ξηρό βάρος των φύλλων και των ριζών προσδιορίστηκε μετά από ξήρανση στους 80 °C για 48 ώρες και η αναλογία υπόγειου προς υπέργειου υπολογίστηκε από τα αντίστοιχα δεδομένα της βιομάζας. Η ειδική μάζα των φύλλων (Leaf specific mass - LSM, g dm^{-2}) καταγράφηκε μετά την ζύγιση ξηρού ιστού φύλλων γνωστής επιφάνειας στο τέλος του πειράματος όπως και το υπέργειο ύψος των φυτών (cm).

2.1.7. Φυσιολογικές παράμετροι και βιοχημικές αναλύσεις των φυτών

2.1.7.1. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών

Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φύλλα μαρουλιού προσδιορίστηκαν σε 15 δείγματα/μεταχείριση, με δειγματοληψίες ανά δέκα ημέρες και στην τελική συγκομιδή. Η εκχύλιση των δειγμάτων (δίσκοι φύλλων γνωστής επιφάνειας) έγινε με 80% ακετόνη και μετά από φυγοκέντρηση (4000 rpm για 10 λεπτά), η απορρόφηση μετρήθηκε στα 720, 663, 646 και 470 nm με φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης (SHIMATZU, UV-1900). Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών χλωροφύλλης α (chl a), χλωροφύλλης β

(chl b) και καροτενοειδών (car) υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των (Lichtenthaler & Wellburn, 1983).

2.1.7.2. PRI

Η ανακλαστικότητα των φύλλων, μετρημένη σε περιορισμένη περιοχή μηκών κύματος με κέντρο κοντά στα 531 nm και 570 nm, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό PRI, ο οποίος υπολογίζεται ως $PRI = (R_{531nm} - R_{570nm}) / (R_{531nm} + R_{570nm})$, όπου R είναι η ανακλαστικότητα σε κάθε μήκος κύματος (Sellers, 1985). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με φορητό όργανο PlantPen PRI 210 (Photon Systems Instruments, Dráson, Τσεχία) που κατέγραψε απευθείας τις τιμές PRI. Οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα μία φορά την εβδομάδα σε ένα ώριμο φύλλο ανά φυτό (15 επαναλήψεις/ομάδα) στο σκοτάδι πριν ανάψουν τα φώτα το πρωί. Τα δεδομένα εξήχθησαν και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με λογισμικό FluorPen (Photon Systems Instruments, Dráson, Τσεχία).

2.1.7.3. Φθορισμός χλωροφύλλης *a in vivo*

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης *a in vivo* παρακολούθηθηκε σε εβδομαδιαία βάση με φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy PEA+ (Hansatech Instruments Ltd., King's Lynn, UK) σε 48 επαναλήψεις ανά μεταχείριση (2 ώριμα φύλλα ανά φυτό). Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πριν από την έναρξη του φωτισμού το πρωί για να εκτιμηθεί η πλήρως προσαρμοσμένη στο σκοτάδι κατάσταση του φωτοσυστήματος II (PSII). Η διέγερση της chl a, καταγράφηκε έπειτα από φωτισμό των φύλλων με μέγιστη ένταση στα 3000 μmol φωτονίων $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ για δύο δευτερόλεπτα. Η ενέργεια διέγερσης παρέχεται από μια κόκκινη συστοιχία λαμπτήρων LED με επίκεντρο τα 650 nm. Το σήμα φθορισμού καταγράφηκε σε πέντε χρονικά σημεία (T1-50 μsecs , T2-100 μsecs , T3-300 μsecs , T4-2 msecs και T5-30 msecs) ενώ οι καμπύλες OJIP αναλύθηκαν με το λογισμικό PeaPlus v.1-13 (Hansatech Instruments Ltd., King's Lynn, UK). Τα πρωτογενή δεδομένα και οι παράμετροι που προέκυψαν σύμφωνα με το JIP test που προτάθηκε από τους (Strasser et al., 2000) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Οι επιλεγμένες παράμετροι που προέρχονται από τη επαγωγή φθορισμού OJIP με τις εξισώσεις και τις επεξηγήσεις τους (Κυζερίδου, 2015).

Παράμετροι	Επεξήγηση
$F_o = F_{50\mu\text{s}}$	Η πρώτη αξιόπιστη τιμή φθορισμού στα 50 μs , όταν θεωρητικώς όλα τα ενεργά κέντρα του PSII είναι ανοιχτά
$F_{300\mu\text{s}}, F_I, F_I$	Η τιμή του φθορισμού στα 300 μs , στα 2ms και στα 30ms, αντίστοιχα
F_M	Η μέγιστη τιμή του φθορισμού, θεωρούμενη ως η τιμή του φθορισμού όταν όλα τα RCs του PSII είναι κλειστά

Area	Η περιοχή μεταξύ της καμπύλης OJIP μέχρι την μέγιστη τιμή φθορισμού F_M
$S_m = \text{Area} - F_V$	Συνολική συμπληρωματική επιφάνεια άνωθεν της OJIP καμπύλης μεταξύ των σημείων O και P, ομαλοποιημένη ως προς το μέγιστο μεταβαλλόμενο φθορισμό.
$F_V = F_M - F_o$	Μέγιστος μεταβαλλόμενος φθορισμός
F_V/F_M	Μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοχημείας του PSII
$M_o = 4 (F_{300 \mu s} - F_o)/(F_M - F_o)$	Αρχική κλίση της καμπύλης επαγωγής του φθορισμού. Υποδεικνύει το ρυθμό με τον οποίο «κλείνουν» σταδιακά τα κέντρα αντίδρασης (RCs), λόγω αναγωγής της Q_A
$V_J = (F_{2 \text{ ms}} - F_o)/(F_M - F_o)$	Σχετικός μεταβαλλόμενος φθορισμός στο σημείο J (στα 2 ms)
$V_I = (F_{30 \text{ ms}} - F_o)/(F_M - F_o)$	Σχετικός μεταβαλλόμενος φθορισμός στο σημείο I (στα 30 ms)
$\phi P_o = TR_o/ABS = F_V/F_M = 1 - F_o/F_M$	Μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της πρωτογενούς φωτοχημείας του PSII
$\phi E_o = ET_o/ABS = \phi P_o \cdot \psi E_o = 1 - F_J/F_M$	Ανά φωτόνιο απόδοση ροής e^- μέχρι τους ενδιάμεσους φορείς e^-
$\phi R_o = \phi P_o \cdot \psi E_o \cdot \delta R_o = 1 - F_I/F_M$	Ανά φωτόνιο απόδοση ροής e^- μέχρι την αναγωγή των τελικών αποδεκτών e^- του PSI
$\psi E_o = ET_o/TR_o = 1 - V_J$	Πιθανότητα κινητοποίησης ροής e^- έως τους ενδιάμεσους φορείς
$\delta R_o = RE_o/ET_o = (1 - V_I)/(1 - V_J)$	Πιθανότητα κινητοποίησης ροής e^- από τους ενδιάμεσους φορείς έως τους τελικούς αποδέκτες του PSI
$1 - V_I$	Απόθεμα των δραστικών κέντρων του PSI
$1/V_I$	Σχετικό απόθεμα των τελικών υποδοχέων e^- του PSI
$ABS/RC = (M_o/V_J) \cdot F_M/(F_M - F_o)$	Απορροφώμενη ενέργεια ομαλοποιημένη ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης (RC) του PSII
$TR_o/RC = M_o/V_J$	Συλληφθείσα ενέργεια ομαλοποιημένη ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης του PSII
$DI_o/RC = (M_o/V_J) \cdot (F_o/F_V)$	Ενέργεια θερμικής απόσβεσης ομαλοποιημένη ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης του PSII
$PI_{\text{total}} = (RC/ABS) \cdot (\phi P_o/1 - \phi P_o) \cdot (\psi E_o/1 - \psi E_o) \cdot (\delta R_o/1 - \delta R_o)$	Δείκτης συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης

2.1.7.4. Φωτοσύνθεση

Οι παράμετροι ανταλλαγής αερίων που σχετίζονται με τη φωτοσύνθεση καταγράφονταν σε εβδομαδιαία βάση καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με ένα φορητό μετρητή φωτοσύνθεσης (LI-6400 XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA). Κατά τη διάρκεια της μέτρησης οι συνθήκες στο εσωτερικό του θαλάμου των φύλλων ρυθμίστηκαν ως εξής: 450 ppm CO₂ με το 6400-01 CO₂ Injector, 500 μmol m⁻²s⁻¹ PPFD παρέχοντας φως από λαμπτήρα LED 6400-02B, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος στο θάλαμο φύλλων και με σταθερή θερμοκρασία 23 °C (παρόμοια με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου). Ο καθαρός ρυθμός αφομοίωσης, η στοματική αγωγιμότητα και ο ρυθμός διαπνοής καταγράφηκαν σε ένα ώριμο φύλλο ανά φυτό για δεκαπέντε φυτά ανά μεταχείριση από τις 10:00 έως τις 12:00.

Οι καμπύλες της εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως πραγματοποιήθηκαν σε τρία χρονικά σημεία, στην αρχή (Ημέρα 7), στη μέση (Ημέρα 21) και στο τέλος (Ημέρα 42) της πειραματικής περιόδου σε οκτώ φύλλα ανά μεταχείριση. Χρησιμοποιήθηκαν 10

διαφορετικές εντάσεις φωτός (1000, 800, 600, 400, 200, 100, 80, 50, 20 και 0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), με τη διάρκεια κάθε βήματος να είναι 3 λεπτά. Οι συνθήκες του θαλάμου των φύλλων διατηρήθηκαν σταθερές όπως περιγράφεται παραπάνω. Το τυπικό πρωτόκολλο λήψης των μετρήσεων από υψηλή έως μηδενική ένταση φωτός ακολουθήθηκε για να αποφευχθεί το κλείσιμο των στομάτων που επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους Markos & Kyriarissis, (2011). Τα δεδομένα περιγράφηκαν από την μοντελοποιημένη καμπύλη (modified non-rectangular hyperbola) που πρότειναν οι Markos & Kyriarissis, (2011). Αυτή επέτρεψε την εκτίμηση του μέγιστου φωτοσυνθετικού ρυθμού (A_{max}), την ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (a , mole CO_2 ανά mole PAR που προσπίπτει στην επιφάνεια του φύλλου) και του ρυθμού μιτοχονδριακής (σκοτεινής) αναπνοής (R_d).

2.1.7.5. Θρέψη φυτών

Στην τελική συγκομιδή, ο ξηρός ιστός των φύλλων αναλύθηκε με φασματοφωτόμετρο ICP-OES (SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Γερμανία) για μακροθρεπτικά συστατικά (N, P, K, Ca, Mg εκφρασμένο ως % επί ξηρού βάρους) και μικροθρεπτικά (Fe, Zn, Mn, Cu εκφρασμένα ως ppm ξηρού βάρους). Αναλύθηκαν τέσσερα δείγματα ανά μεταχείριση (συγκεντρωμένα από δύο φυτά το κάθε δείγμα). Η μέθοδος περιλάμβανε δίωρη πέψη (στους 30 °C) 0,25 g σκόνης φύλλων με 4,4 mL διαλύματος που περιείχε 1,94 mL πυκνό θειικό οξύ, 2,82 mg Se, 82,13 mg Li_2SO_4 και 1,94 mL 30% H_2O_2 . Πριν από την ανάλυση, τα δείγματα αραιώθηκαν με 50 mL απεσταγμένο νερό αφού έφταναν σε θερμοκρασία δωματίου (Avdouli et al., 2021). Για την μέτρηση της συγκέντρωσης Na, 18 δείγματα ανά μεταχείριση αναλύθηκαν στην τελική συγκομιδή. Κάθε δείγμα περιείχε 0,5g ξηρού κονιοροποιημένου φύλλου που αποτεφρώθηκε στους 500°C για 3 ώρες. Τα δείγματα εκχυλίστηκαν με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 6% με τελικό όγκο 50 ml. Η απορρόφηση του νατρίου μετρήθηκε με φλογοφωτόμετρο (JENWAY, PFP7 Flame Photometer) και οι συγκεντρώσεις υπολογίστηκαν με βάση πρότυπη καμπύλη. Τέλος, η συγκέντρωση στον φυτικό ιστό υπολογίστηκε από την αναγωγή στην μονάδα του ξηρού βάρους.

2.1.7.6. Αντιοξειδωτική ικανότητα

Για την εκτίμηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) σύμφωνα με τους Goupy et al., (1999) και Hayes et al., (2011) με μικρές τροποποιήσεις, σε 24 δείγματα ανά μεταχείριση σε δεκαήμερη βάση. Η εκχύλιση από φρεσκοκομμένα φύλλα μαρουλιού (350 mg) πραγματοποιήθηκε με 25 mL μεθανόλης σε μύλο για 30 δευτερόλεπτα, και ακολούθησε ανακίνηση στο σκοτάδι (1050 rpm) για 20 λεπτά.

Τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν στα 2218 x g για 10 λεπτά, και τα υπερκείμενα αραιώθηκαν με μεθανόλη (1:1) και αναλύθηκαν αμέσως. Η αντίδραση του δείγματος (2 mL) με το καθημερινά παρασκευασμένο διάλυμα DPPH (100 μM, 2 mL) έλαβε χώρα στο σκοτάδι για 30 λεπτά και μετά καταγράφηκε η απορρόφηση στα 517 nm, χρησιμοποιώντας ως μάρτυρα (Control) δείγμα μεθανόλης-DPPH. Μια πρότυπη καμπύλη ετοιμάστηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικές συγκεντρώσεις ασκορβικού οξέος ($A_{517nm} = -0,0008 \times \text{Ασκορβικό οξύ} + 1,3029$, $R^2 = 0,9973$) και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε mg ασκορβικού οξέος g^{-1} νωπού βάρους των φύλλων.

Επιπλέον, η αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων μαρουλιού αξιολογήθηκε μέσω της συγκέντρωσης ολικών φαινολικών με τη μέθοδο Folin-Ciocalteu (Waterman & Mole, 1994). Ξηρός φυτικός ιστός (300 mg) εκχυλίστηκε σε 6 mL μεθανόλης 50% μέσω επώασης των δειγμάτων σε υδατόλουτρο στους 40 °C για 1 ώρα. Τα εκχυλίσματα (50 μl) αντέδρασαν με το αντιδραστήριο Folin-Ciocalteu (250 μl) και το διάλυμα ανθρακικού νατρίου (Na_2CO_3 , 750 μl) σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες. Στη συνέχεια, τα δείγματα φωτομετρήθηκαν (Φασματοφωτόμετρο SHIMADZU UV 1900 UV-VIS, Γερμανία) στα 760 nm και οι απορροφήσεις μετατράπηκαν σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος με αναγωγή στα 100 g ξηρού βάρους φύλλου ($mg\ 100g^{-1}DW$) μέσω πρότυπης καμπύλης αναφοράς (Γαλλικό οξύ (mg) = $0,00973 + 0,08175 \times A_{760nm}$).

2.1.8. Στατιστική ανάλυση

Τα δεδομένα αναλύθηκαν στατιστικά με one-way ANOVA, ακολουθούμενη από έλεγχο Tukey post hoc για τις παραμέτρους στις οποίες ίσχυαν οι προϋποθέσεις της ANOVA. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Kruskal–Wallis και το post-hoc test Dunn. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το ελεύθερο λογισμικό JASP v.0.16 (JASP Team 2021 Computer Software).

2.2. Αποτελέσματα

2.2.1. Θρεπτικό διάλυμα

Οι φυσικοχημικές παράμετροι του θρεπτικού διαλύματος, όπως το pH και το DO, ήταν σταθερές κατά την πειραματική περίοδο χωρίς διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πίνακας 4). Η EC ήταν σημαντικά υψηλότερη στην ομάδα Fe+K λόγω της συμπλήρωσης K_2SO_4 . Οι εβδομαδιαίες μετρήσεις της ποιότητας του νερού έδειξαν ότι δεν υπήρχαν διαφορές στις συγκεντρώσεις αμμωνίας, νιτρικών, φωσφορικών και νατρίου μεταξύ των ομάδων (Πίνακας 4). Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις σιδήρου, το Control ήταν κοντά στο μηδέν ενώ δεν

ανιχνεύθηκαν διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, με τις τιμές τους να είναι κοντά στη συγκέντρωση-στόχο. Στη μεταχείριση Fe+K καταγράφηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις καλίου, θειϊκών και ασβεστίου σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Δεδομένου ότι δεν πραγματοποιήθηκε προσθήκη ασβεστίου στο νερό, η υψηλότερη συγκέντρωση Ca μπορεί να υποδηλώνει χαμηλότερο ρυθμό απορρόφησης από τα φυτά του συγκεκριμένου θρεπτικού συστατικού.

Πίνακας 4. Φυσικοχημικές και ποιοτικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο, εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM ($n=117$ για pH, $n=60$ για DO και EC, $n=21$ για NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Fe, K, Ca^{2+} , Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe+K
pH	7,04 \pm 0,04 ^a	7,01 \pm 0,05 ^a	7,08 \pm 0,04 ^a
DO (mg L ⁻¹)	8,22 \pm 0,09 ^a	8,05 \pm 0,08 ^a	8,05 \pm 0,08 ^a
EC (μ S cm ⁻¹)	924,35 \pm 25,35 ^b	950,29 \pm 25,61 ^b	1628,44 \pm 61,85 ^a
NH ₃ (mg L ⁻¹)	0,06 \pm 0,01 ^a	0,07 \pm 0,01 ^a	0,08 \pm 0,01 ^a
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	0,04 \pm 0,004 ^a	0,03 \pm 0,004 ^a	0,03 \pm 0,004 ^a
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	111,09 \pm 11,89 ^a	100,64 \pm 11,05 ^a	95,11 \pm 10,22 ^a
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	41,64 \pm 2,44 ^a	38,81 \pm 2,03 ^a	45,41 \pm 3,41 ^a
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	41,13 \pm 1,74 ^b	44,17 \pm 1,38 ^b	319,62 \pm 28,25 ^a
Fe (mg L ⁻¹)	0,11 \pm 0,04 ^b	1,67 \pm 0,17 ^a	1,65 \pm 0,17 ^a
K (mg L ⁻¹)	10,65 \pm 1,45 ^b	9,81 \pm 1,35 ^b	278,99 \pm 25,99 ^a
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	22,57 \pm 1,92 ^b	24,34 \pm 2,37 ^b	32,09 \pm 2,92 ^a
Na (mg L ⁻¹)	96,46 \pm 6,74 ^a	101,67 \pm 6,36 ^a	91,15 \pm 5,29 ^a

2.2.2. Ανάπτυξη ψαριών

Στην αρχή του πειράματος δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα αρχικά βάρη και τα μήκη των ψαριών (Πίνακας 5). Τα ποσοστά επιβίωσης των ψαριών κυμαίνονταν από 88% έως 90% σε όλες τις ομάδες. Τα ποσοστά κατανάλωσης τροφής ήταν παρόμοια για τις τρεις μεταχειρίσεις, ενώ δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές στο FCR. Υπήρξε μια στατιστικά σημαντική αύξηση του SGR στις ομάδες Fe και Fe+K σε σύγκριση με την ομάδα Control.

Πίνακας 5. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=90$). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe+K
Αρχικό βάρος (g)	15,97 \pm 0,61 ^a	16,06 \pm 0,62 ^a	16,07 \pm 0,63 ^a
Αρχικό μήκος (cm)	9,98 \pm 0,14 ^a	9,93 \pm 0,15 ^a	9,95 \pm 0,15 ^a
Τελικό βάρος (g)	52,32 \pm 1,62 ^a	57,23 \pm 2,15 ^a	57,48 \pm 2,11 ^a
Τελικό μήκος (cm)	14,42 \pm 0,14 ^a	14,73 \pm 0,17 ^a	14,72 \pm 0,18 ^a
Ημερήσια κατανάλωση τροφής (g day ⁻¹)	21,84 \pm 0,68 ^a	23,30 \pm 0,74 ^a	24,22 \pm 0,68 ^a

WG (g)	35,43 ± 1,10 ^b	40,09 ± 1,64 ^a	40,53 ± 1,55 ^a
SGR (% day ⁻¹)	2,55 ± 0,04 ^b	2,67 ± 0,05 ^a	2,73 ± 0,04 ^a
FCR	0,93 ± 0,04 ^a	0,86 ± 0,04 ^a	0,84 ± 0,04 ^a
Επιβίωση (%)	90,00 ^a	88,89 ^a	88,89 ^a

2.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας μαρουλιού

Η σημαντικά χαμηλότερη ανάπτυξη των φυτών-μαρτύρων ήταν εμφανής στην τελική συγκομιδή (Πίνακας 6), ενώ η μεταχείριση Fe+K είχε ως αποτέλεσμα τις μέγιστες τιμές όλων των μετρούμενων παραμέτρων. Η νωπή και ξηρή βιομάζα τόσο του υπέργειου όσο και του υπόγειου τμήματος, καθώς και η συνολική επιφάνεια των φύλλων υπερδιπλασιάστηκαν με τη συμπλήρωση Fe+K σε σύγκριση με το Control. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με Fe βρισκόνταν σε μια ενδιάμεση θέση μεταξύ των δύο άλλων ομάδων, παρουσιάζοντας σημαντικές διαφορές είτε με την ομάδα Fe+K (σε νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους και τον αριθμό των φύλλων) είτε με το Control (ξηρό βάρος υπέργειου κα υπόγειου τμήματος).

Πίνακας 6. Παράμετροι ανάπτυξης του μαρουλιού που μετρήθηκαν στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι ± SEM, n=24). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

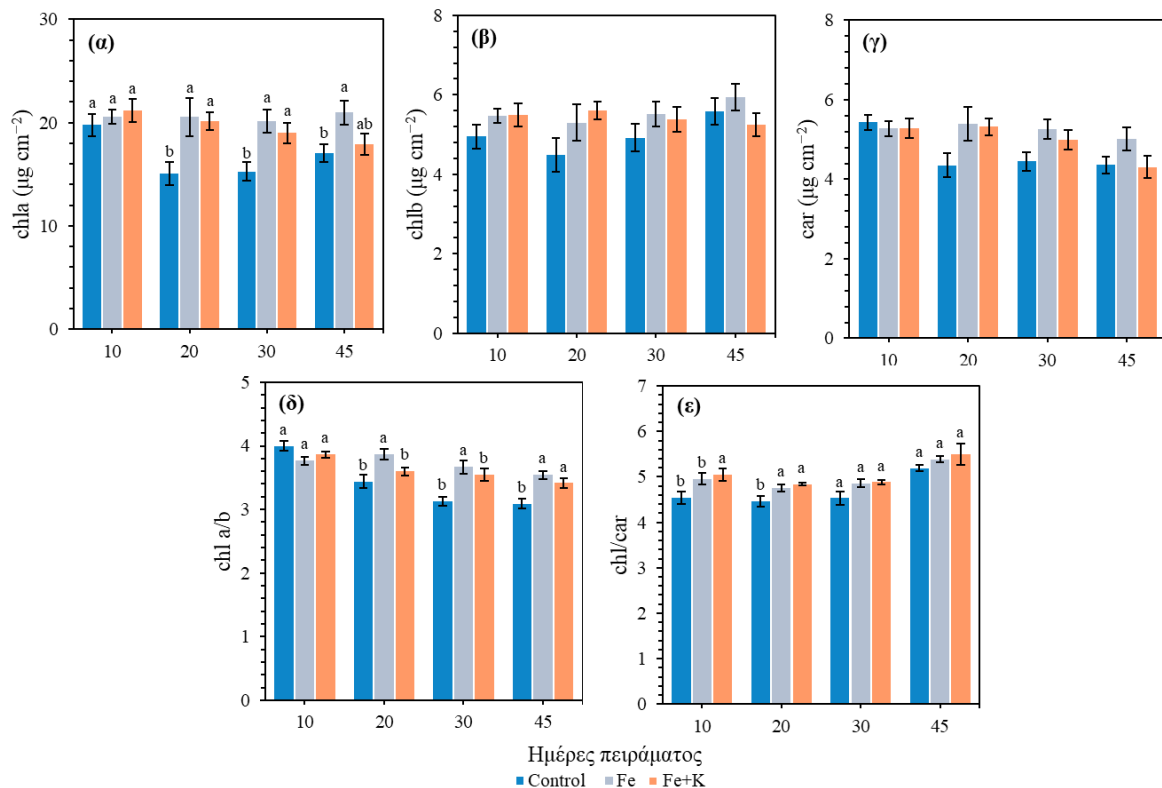
	Control	Fe	Fe+K
Νωπό βάρος υπέργειου (g)	148,98 ± 20,14 ^b	190,35 ± 21,97 ^b	322,99 ± 42,51 ^a
Ξηρό βάρος υπέργειου (g)	6,77 ± 0,71 ^c	9,18 ± 0,95 ^b	14,26 ± 1,65 ^a
Ξηρό βάρος υπόγειου (g)	1,19 ± 0,35 ^b	2,05 ± 0,57 ^a	2,65 ± 0,66 ^a
Υπόγειο / Υπέργειο	0,15 ± 0,03 ^a	0,19 ± 0,03 ^a	0,17 ± 0,02 ^a
Αριθμός φύλλων	32,54 ± 1,50 ^b	34,83 ± 1,53 ^b	41,96 ± 1,88 ^a
Φυλλική επιφάνεια (cm ²)	2230,80 ± 275,15 ^b	2809,52 ± 320,01 ^{ab}	4205,98 ± 527,83 ^a
LSM (g dm ⁻²)	0,25 ± 0,02 ^a	0,27 ± 0,01 ^a	0,28 ± 0,02 ^a
Ύψος (cm)	24,72 ± 0,74 ^a	25,52 ± 0,95 ^a	26,13 ± 0,93 ^a



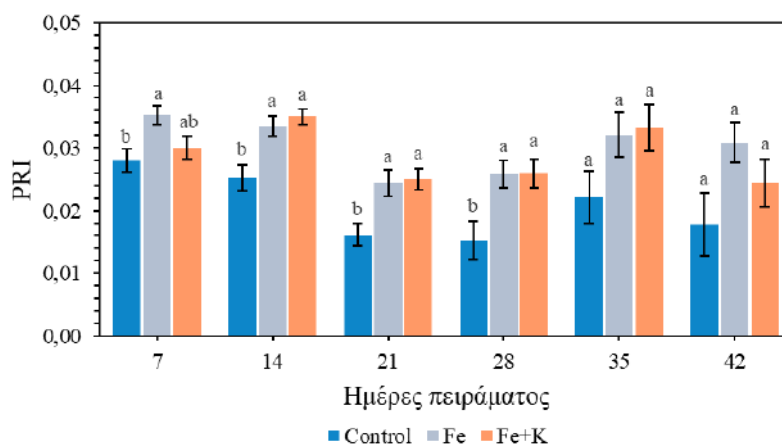
Εικόνα 13. Κάτοψη της κλίνης καλλιέργειας μαρουλιών των τριών μεταχειρίσεων πριν την συγκομιδή των φυτών στα ενυδρειοπονικά συστήματα (α) ομάδα Control, (β) ομάδα Fe, (γ) ομάδα Fe+K. Το μέγεθος κάθε καλλιεργητικής περιοχής ήταν 1m².

Η συγκέντρωση όλων των φωτοσυνθετικών χρωστικών ακολούθησε παρόμοιο πρότυπο κατά την πειραματική περίοδο (Γράφημα 1). Στην πρώτη μέτρηση καταγράφηκαν υψηλά επίπεδα, τα οποία ήταν σταθερά σε όλο το πείραμα για τις ομάδες Fe και Fe+K. Ωστόσο, τα φυτά στο Control εμφάνισαν μείωση από την ημέρα 20 και μετά σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες, με στατιστικά σημαντικές διαφορές μόνο στην chl_a. Η αναλογία chl a/b ήταν σημαντικά χαμηλότερη στα Control, όπως συνέβη και με τη συνολική αναλογία chls/car τις δύο πρώτες ημέρες δειγματοληψίας, που υποδηλώνει σχετικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε chl_b και car αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα που σχετίζονται με την ανακλαστικότητα των φύλλων και συγκεκριμένα τον δείκτη PRI παρουσίασαν από την πρώτη εβδομάδα της καλλιέργειας στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (Γράφημα 2). Στα φυτά Control καταγράφηκαν χαμηλότερες τιμές του PRI συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις από την ημέρα 15 μέχρι και τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου.



Γράφημα 1. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και οι αναλογίες τους κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι ± SEM, n=15). (α) chl_a, (β) chl_b, (γ) car, (δ) αναλογία chl a προς b, (ε) chls/car. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα (p ≤ 0,05) και η απουσία γραμμάτων στα (β) και (γ) υποδηλώνει απουσία σημαντικών διαφορών.

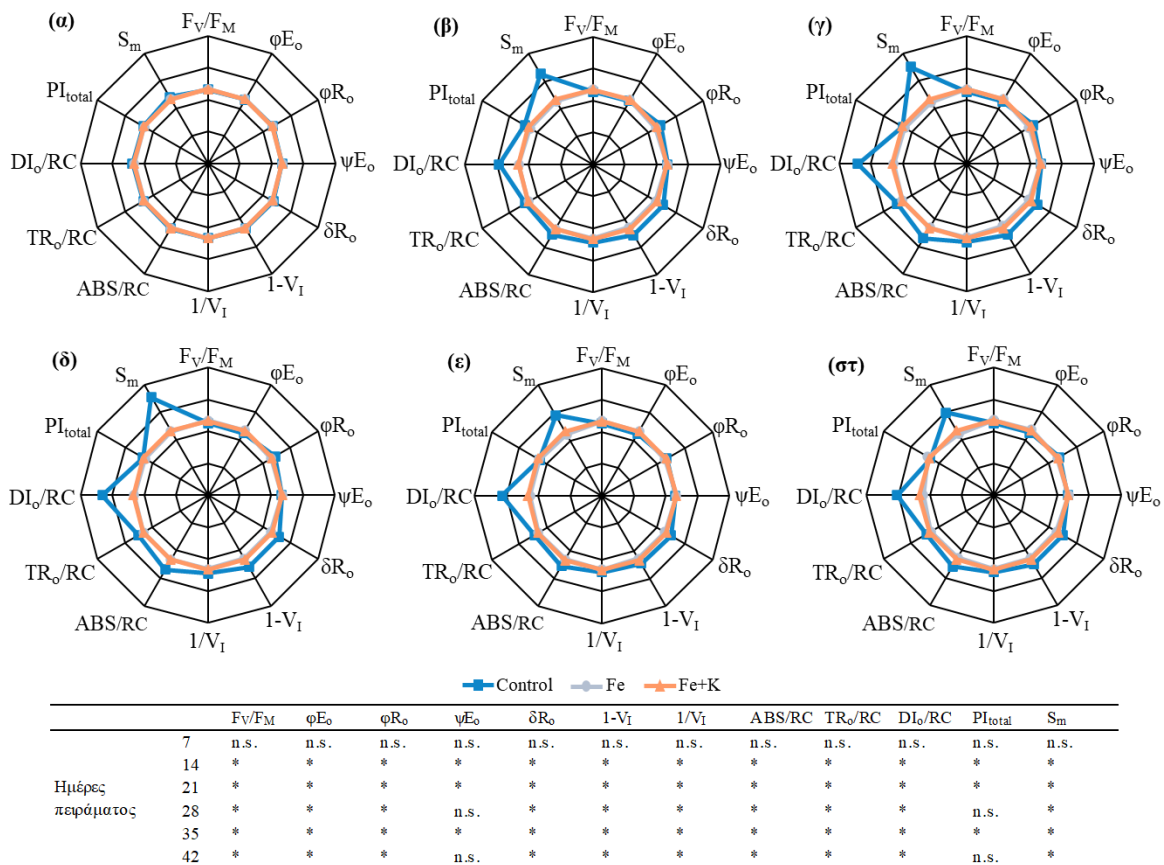


Γράφημα 2. Τιμές PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στο μαρούλι (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=24$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

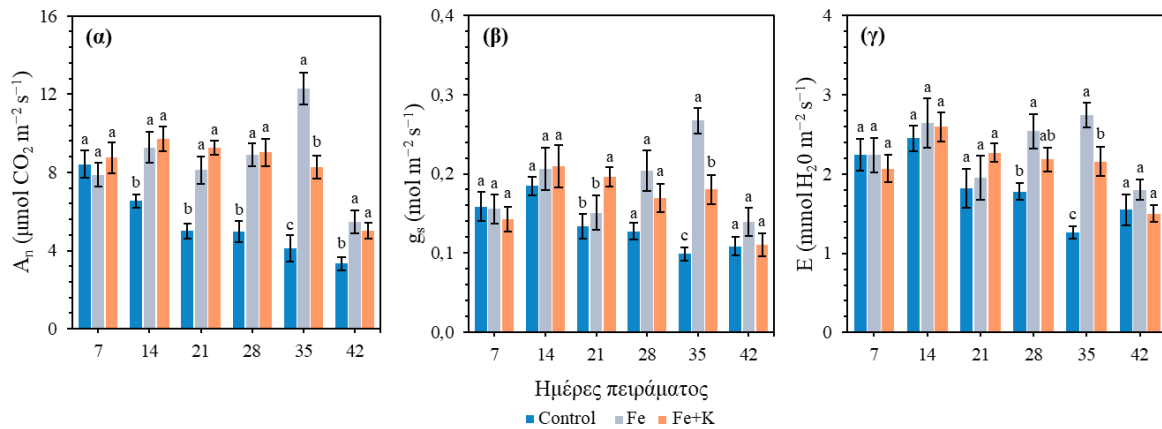
Οι παράμετροι του φθορισμού της *chl a in vivo* σε προσκοτεινιασμένα φύλλα απεικονίζονται στο Γράφημα 3. Η μέγιστη φωτοχημική απόδοση του PSII, που υποδεικνύεται από λόγο F_v/F_M , καθώς και ο δείκτης φωτοσυνθετικής απόδοσης (PI_{total}) ήταν υψηλός για όλες τις μεταχειρίσεις στην πρώτη μέτρηση (ημέρα 7). Μετά από αυτό το χρονικό σημείο, μια σημαντική μείωση ήταν εμφανής στα Control φυτά, ενώ τα φυτά με Fe και Fe+K διατήρησαν τις αρχικές υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια του πειράματος. Παρόμοιο πρότυπο ακολουθήθηκε από τον παράγοντα ϕE_0 που σχετίζεται με την ανά φωτόνιο απόδοση ροής e^- μέχρι τους ενδιάμεσους φορείς e^- . Αντίθετα, παράμετροι που σχετίζονται με το PSI παρουσίασαν βελτιωμένη απόδοση στην ομάδα Control από την ημέρα 14 και έπειτα, σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Έτσι, λειτουργικές παράμετροι που σχετίζονται με την ανά φωτόνιο απόδοση ροής e^- μέχρι την αναγωγή των τελικών αποδεκτών e^- του PSI (ϕR_0), καθώς και δομικές παράμετροι, όπως το $1-V_I$ που σχετίζεται με το απόθεμα των δραστικών κέντρων του PSI, αυξήθηκαν σημαντικά στην ομάδα Control από την 14^η ημέρα, παραμένοντας σε ακόμη υψηλότερα επίπεδα μέχρι το τέλος. Το ίδιο μοτίβο ακολούθησαν οι δείκτες ενεργειακής ροής, όπως ABS/RC και TR_0/RC που πιθανώς υποδηλώνουν μειωμένο αριθμό ενεργών κέντρων αντίδρασης (RC) του PSII. Μια σημαντική ενίσχυση της ενέργειας που αποσβέστηκε (dissipated energy) ομαλοποιημένη ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης του PSII στην ομάδα Control αποδείχθηκε από τις αυξημένες τιμές του DI_0/RC ήδη από την ημέρα 14. Τέλος, το απόθεμα των πρωτογενών αποδεκτών e^- (Q_A) του PSII που αντανακλάται στην παράμετρο S_m , ήταν υψηλότερο στα Control από την ημέρα 14 μέχρι το τέλος του πειράματος.

Οι επιπτώσεις των διαφορετικών μεταχειρίσεων στην ανταλλαγή αερίων ήταν ήδη εμφανείς από τη δεύτερη εβδομάδα του πειράματος (Γράφημα 4). Τα φυτά Control είχαν τις

χαμηλότερες αποδόσεις σε όλες τις μετρούμενες παραμέτρους. Οι ρυθμοί φωτοσύνθεσης τους παρουσίασαν πτωτική τάση από την 14^η ημέρα μέχρι το τέλος. Αντίθετα, οι προσθήκες Fe και Fe+K διατήρησαν υψηλούς ρυθμούς φωτοσύνθεσης καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, εκτός από την τελευταία μέτρηση, χωρίς όμως να καταγράφονται διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων ομάδων. Τα φυτά Fe ξεπέρασαν τις άλλες ομάδες στα επίπεδα στοματικής αγωγιμότητας και τον ρυθμό διαπνοής, αν και οι διαφορές με την ομάδα Fe+K ήταν σημαντικές μόνο σε δύο ημερομηνίες μέτρησης στο δεύτερο μισό του πειράματος.

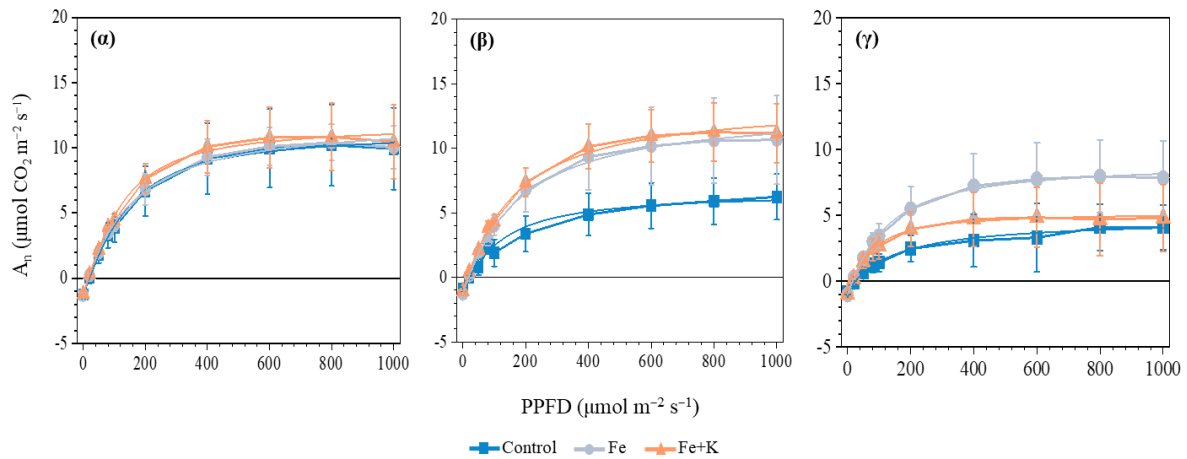


Γράφημα 3. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων των JIP-test που συνάγονται από τις καμπύλες OJIP φθορισμού chl a για το μαρούλι (Μέσοι όροι, n=48) για 6 πειραματικές ημέρες. (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 14, (γ) Ημέρα 21, (δ) Ημέρα 28, (ε) Ημέρα 35, (στ) Ημέρα 42. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν σύμφωνα με την μεταχείριση Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, όλες οι ενδείξεις αναφέρονται σε διαφορές του Control με τις άλλες δύο ομάδες (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές και ο αστερίσκος δείχνει διαφορές στο $p \leq 0,001$).



Γράφημα 4. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το μαρούλι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

Η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός μετρήθηκε στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (Γράφημα 5). Οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}) και οι κβαντικές αποδόσεις φωτοσύνθεσης (a) που εξήχθησαν από αυτές τις καμπύλες ήταν παρόμοιες μεταξύ των μεταχειρίσεων μόνο στην πρώτη μέτρηση, την ημέρα 7. Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών στην ομάδα Control μειώθηκε σημαντικά, ενώ τα φυτά Fe και Fe+K έδειξαν σταθερές τιμές εκτός από την τελική μέτρηση. Πριν την τελική συγκομιδή, η ομάδα Fe+K εμφάνισε απότομη μείωση στη φωτοσυνθετική απόκριση για PPFD $> 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, σε αντίθεση με τα φυτά που δέχτηκαν μόνο Fe, στα οποία εμφανίστηκε μόνο μια ελαφρά μείωση τόσο του A_{max} όσο και του a , με αποτέλεσμα την ύπαρξη σημαντικών διαφορών μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η Rd ήταν υψηλή στα νεαρά αναπτυσσόμενα φύλλα της ημέρας 7, αλλά στη συνέχεια μειώθηκε στο Control, ενώ διατήρησε σχετικά υψηλές τιμές στις άλλες δύο ομάδες.



Ημέρες πειράματος	A_{max}			a			Rd		
	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K
7	11,89 ± 1,26 ^a	12,13 ± 0,65 ^a	12,30 ± 1,06 ^a	0,06 ± 0,01 ^a	0,07 ± 0,01 ^a	0,07 ± 0,01 ^a	-1,16 ± 0,10 ^a	-1,21 ± 0,08 ^a	-1,08 ± 0,09 ^a
21	7,83 ± 0,71 ^b	12,59 ± 1,35 ^a	12,84 ± 0,89 ^a	0,03 ± 0,01 ^b	0,07 ± 0,01 ^a	0,06 ± 0,01 ^a	-0,84 ± 0,06 ^b	-1,22 ± 0,09 ^a	-0,97 ± 0,07 ^{ab}
42	5,13 ± 0,73 ^b	9,38 ± 1,15 ^a	6,07 ± 0,94 ^{ab}	0,03 ± 0,01 ^c	0,06 ± 0,02 ^a	0,06 ± 0,01 ^b	-0,78 ± 0,07 ^a	-0,94 ± 0,13 ^a	-0,96 ± 0,11 ^a

Γράφημα 5. Καμπύλες εξάρτησης φωτοσύνθεσης από το φως για το μαρούλι (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 21, (γ) Ημέρα 42 (Μέσοι όροι ± SEM, n=8). Στον πίνακα παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι μέγιστοι φωτοσυνθετικοί ρυθμοί (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (a) και μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Τα διαφορετικά γράμματα ανά σειρά δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).

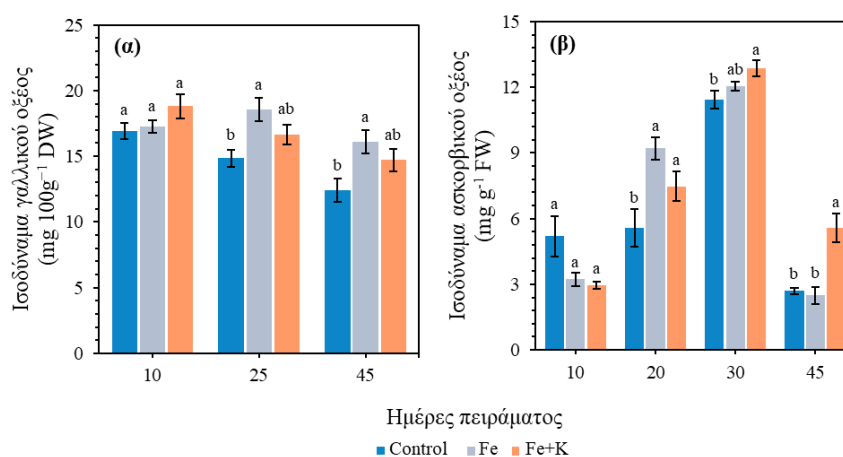
Η καταγραφή της θρεπτικής σύστασης των φύλλων μαρουλιού (Πίνακας 7) εμφάνισε παρόμοια επίπεδα αζώτου, φωσφόρου, ψευδαργύρου και χαλκού σε όλες τις ομάδες φυτών. Η περιεκτικότητα σε κάλιο και σίδηρο επηρεάστηκε ισχυρά από τις αντίστοιχες προσθήκες στο θρεπτικό διάλυμα, με αποτέλεσμα σημαντικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς του Control. Οι συγκεντρώσεις Mg και Ca διέφεραν μεταξύ μεταχειρίσεων, καθώς ήταν υψηλότερες στα φυτά Fe και Control ενώ ήταν χαμηλότερες στην ομάδα Fe+K. Τέλος, η περιεκτικότητα των φύλλων σε Mn ήταν τρεις φορές υψηλότερη και στις δύο ομάδες που δέχτηκαν προσθήκη θρεπτικών συστατικών.

Πίνακας 7. Θρεπτική σύσταση των φύλλων μαρουλιού στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι ± SEM, n=4). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g⁻¹ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

		Control	Fe	Fe+K
%	N	3,39 ± 0,22 ^a	3,28 ± 0,03 ^a	3,39 ± 0,26 ^a
	P	0,70 ± 0,05 ^a	0,77 ± 0,04 ^a	0,76 ± 0,02 ^a
	K	6,87 ± 0,28 ^b	5,93 ± 0,22 ^b	7,56 ± 0,53 ^a
	Ca	1,46 ± 0,11 ^a	1,36 ± 0,10 ^a	1,20 ± 0,12 ^b
	Mg	0,37 ± 0,04 ^b	0,43 ± 0,01 ^a	0,30 ± 0,02 ^c
ppm	Fe	54,70 ± 6,52 ^b	82,99 ± 7,02 ^a	90,01 ± 15,00 ^a
	Zn	19,14 ± 2,30 ^a	23,01 ± 1,56 ^a	23,63 ± 2,47 ^a

	Mn	7,00 ± 0,68 ^b	24,44 ± 1,35 ^a	23,96 ± 2,86 ^a
	Cu	5,31 ± 0,26 ^a	5,90 ± 0,68 ^a	7,04 ± 1,76 ^a
mg g ⁻¹	Na	4,84 ± 0,59 ^a	3,13 ± 0,77 ^b	1,13 ± 0,17 ^c

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων του μαρουλιού άλλαξε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου (Γράφημα 6) σε όλες τις ομάδες φυτών. Τα επίπεδα των ολικών φαινολικών φάνηκε να επηρεάζονται μετά τα μέσα του πειράματος και μέχρι την τελική συγκομιδή. Συγκεκριμένα, την υψηλότερη συγκέντρωση ισοδύναμων γαλλικού οξέος κατέγραψε η ομάδα Fe ενώ η προσθήκη επιπλέον καλίου δεν διαφοροποίησε σημαντικά την συγκέντρωση των ολικών φαινολικών συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων, όπως εκτιμήθηκε μέσω της μεθόδου DPPH φάνηκε να αυξάνεται σταδιακά καθώς τα φυτά ωρίμαζαν με την πάροδο του χρόνου (ημέρα 20 και ακόμη πιο σημαντικά την ημέρα 30) φτάνοντας σε διπλασιασμό της αντίστοιχης συγκέντρωσης ισοδύναμων ασκορβικού οξέος σε σχέση με την ημέρα 10. Είναι ενδιαφέρον ότι στο τέλος του πειράματος, οι τιμές αυτές μειώθηκαν στα επίπεδα της πρώτης μέτρησης. Όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών στο Control φάνηκε να υπολείπεται σημαντικά των φυτών Fe+K σε όλες τις ημέρες δειγματοληψίας, εκτός από την πρώτη μέτρηση την ημέρα 10.



Γράφημα 6. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων κατά την πειραματική περίοδο: (α) συγκέντρωση ολικών φαινολικών εκφρασμένων ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νεπού ιστού (Μέσοι όροι ± SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

2.3. Συζήτηση

Η συνδυασμένη παραγωγή φυτών και ψαριών που έχουν διαφορετικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις για την βέλτιστη ανάπτυξη τους απαιτεί ορισμένους συμβιβασμούς στις φυσικοχημικές συνθήκες της καλλιέργειας, ιδιαίτερα για το pH και τη θερμοκρασία. Ένα εύρος pH 7,5–8,0 θεωρείται βέλτιστο για την ανάπτυξη των ψαριών καθώς και για τη διαδικασία νιτροποίησης, η οποία μετατρέπει τα απόβλητα του μεταβολισμού των ψαριών σε κατάλληλες μορφές για τα φυτά (Rakocy et al., 2004). Η απορρόφηση θρεπτικών συστατικών του νερού από τα φυτά είναι αποτελεσματική σε πολύ χαμηλότερες τιμές pH, δηλαδή 5,5–6,0 (Sonneveld & Voogt, 2009). Στην παρούσα μελέτη, το σύστημα αφέθηκε να ωριμάσει και κατάφερε να φτάσει σε ισορροπία, με αποτέλεσμα τιμές pH κοντά στο 7,0 χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η θερμοκρασία διατηρήθηκε συνεχώς στους 23 °C ως συμβιβασμός μεταξύ των 28 °C που απαιτούνται από την τιλάπια και 15–22 °C που είναι το βέλτιστο για την παραγωγή του μαρουλιού (Cai et al., 2018; Somerville et al., 2014). Το DO στο νερό διατηρήθηκε σταθερό σε επίπεδα ευνοϊκά για τα ψάρια και τα βακτήρια (7,0–8,0 mg L⁻¹), ενώ ο αερισμός των ριζικών συστημάτων των φυτών εξασφαλίστηκε από την τεχνική της καλλιέργειας σε υπόστρωμα (media bed) που αναφέρεται ότι διατηρεί καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης από την καλλιέργεια σε πλωτά συστήματα (Deep Water Culture, DWC) ή της τεχνικής λεπτού στρώματος διαβροχής των ριζών (Nutrient Film Technique, NFT) (Maucieri et al., 2017). Τα φυτά που υποβλήθηκαν σε συμπληρωματική λίπανση με Fe+K αντιμετώπισαν αυξημένη EC κατά 1,7 φορές σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες, όπως αναμενόταν κυρίως λόγω των ενισχυμένων θειϊκών αλάτων που προέκυψαν από τη χρήση θειικού καλίου (Rakocy et al., 2006).

Σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας κλειστού τύπου (συζευγμένο σύστημα), το άζωτο για τη θρέψη των φυτών προέρχεται κυρίως από τις εκκρίσεις των ψαριών. Υπολογίζεται ότι οι συνολικές εκκρίσεις των ψαριών αποτελούνται από 30–65% άζωτο και 40% φώσφορο, με τα ακριβή ποσοστά να εξαρτώνται από τη σύνθεση της ιχθυοτροφής (Schneider et al., 2005). Η αμμωνία, η οποία είναι το κύριο απόβλητο που παράγεται από το μεταβολισμό των ψαριών, είναι τοξική για τα ψάρια καθώς επηρεάζει το κεντρικό νευρικό τους σύστημα, προκαλώντας σπασμούς και θάνατο σε συγκεντρώσεις 2,79 mg NH₃ L⁻¹ (Randall & Tsui, 2002). Στην παρούσα μελέτη, τα επίπεδα αμμωνίας διατηρήθηκαν κοντά σε μηδενικές συγκεντρώσεις και συγκεκριμένα κυμάνθηκαν από 0,06 έως 0,08 mg L⁻¹, διασφαλίζοντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των ψαριών. Τα νιτρικά που προήλθαν από τη διαδικασία νιτροποίησης ήταν κοντά στα 100 mg L⁻¹, υψηλότερα από τα επίπεδα που αναφέρθηκαν από τους (Rafiee et al.,

2019) σε ένα σύστημα μαρουλιού-τιλάπιας (75 mg L^{-1}), ενώ οι συχνά δημοσιευμένες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου για τα φυλλώδη λαχανικά κυμαίνονται από $42,2\text{--}63,5 \text{ mg L}^{-1}$ (Delaide et al., 2016; Nicoletto et al., 2018). Οι συγκεντρώσεις ασβεστίου στο νερό ήταν 5,6-8,0 φορές χαμηλότερες από τις προτεινόμενες για την ενυδραιοπονία που είναι 180 mg L^{-1} (Pantanella et al., 2012), γι' αυτό το λόγο στα φυτά μαρουλιού χορηγήθηκε ασβέστιο σε μορφή ψεκάσμου δύο φορές εβδομαδιαία σε όλες τις μεταχειρίσεις για την αποφυγή τροφopenίας. Ενώ τα άλλα θρεπτικά συστατικά ήταν επαρκή σε όλες τις μεταχειρίσεις, όμως η περιεκτικότητα σε νάτριο ξεπέρασε ελαφρώς το κρίσιμο επίπεδο των 90 mg L^{-1} για το μαρούλι (Resh, 2013). Πάνω από αυτό το επίπεδο εμφανίζονται συμπτώματα τοξικότητας, ενώ η αναλογία Na/K αυξάνεται πολύ - σε συνδυασμό και με την ανεπάρκεια K, δημιουργώντας ανταγωνισμό για την απορρόφηση του δευτέρου από τις ρίζες (Sonneveld & Voogt, 2009). Εντούτοις, στο μαρούλι δεν καταγράφηκαν σημάδια τοξικότητας. Τέλος, η χημική ανάλυση του νερού του συστήματος αποκάλυψε ότι η συμπλήρωση Fe και K παρείχε στις ρίζες των φυτών των αντίστοιχων μεταχειρίσεων επαρκή επίπεδα σύμφωνα με τις ευρέως χρησιμοποιούμενες συγκεντρώσεις στην υδροπονία και στην ενυδραιοπονία $59,5\text{--}430 \text{ mg L}^{-1}$ και $2,2\text{--}5,0 \text{ mg L}^{-1}$ αντίστοιχα (Delaide et al., 2016; Resh, 2013; Sonneveld & Voogt, 2009).

Η τιλάπια και το γατόψαρο είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη στα συστήματα ενυδραιοπονίας λόγω της ανοχής τους σε μια σειρά αβιοτικών συνθηκών και των υψηλών εισροών ανόργανων θρεπτικών που συμπληρώνονται συχνά στην ενυδραιοπονία (da Silva et al., 2020; Rafiee et al., 2019; Rakocy et al., 2004). Η κόκκινη τιλάπια στην παρούσα μελέτη ευνοήθηκε σημαντικά από τη συμπλήρωση θρεπτικών και παρουσίασε υψηλότερο SGR σε σύγκριση με την ομάδα του Control, φτάνοντας τελικά στο $2,72\% \text{ day}^{-1}$ στην ομάδα Fe+K. Αυτό το αποτέλεσμα είναι συγκρίσιμο με το $2,58\% \text{ day}^{-1}$ που αναφέρθηκε από τους da Silva et al., (2020), ενώ οι Rafiee et al., (2019) βρήκαν χαμηλότερο SGR $1,84 \pm 0,13\% \text{ day}^{-1}$, με τα τρία πειράματα να ακολουθούν το ίδιο πρωτόκολλο σίτισης. Η εξωτερική προσθήκη καλίου και σιδήρου δεν επηρέασε την κατανάλωση τροφής, το FCR και το ποσοστό επιβίωσης, το οποίο έφτασε το 90% σε όλες τις μεταχειρίσεις. Μια πρόσφατη μελέτη σε ένα σύστημα καλλιέργειας ρόκας-τιλάπιας έδειξε ότι παρόμοια συμπληρώματα σιδήρου και καλίου δεν επηρεάζουν την ανάπτυξη της κόκκινης τιλάπιας ούτε προκαλούν ιστοπαθολογικές αλλοιώσεις στα βράγχια των ψαριών, το ήπαρ και το τμήμα του μεσεντέρου (Stathopoulou et al., 2021). Η καθημερινή ποσότητα της ιχθυοτροφής που προσφέρθηκε και καταναλώθηκε από τα ψάρια ήταν $21,85\text{--}24,2 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, ποσότητα που είναι επαρκής για τις διατροφικές απαιτήσεις του μαρουλιού, σύμφωνα με τον Lennard,

(2012b), ο οποίος ανέφερε ότι 13 g ιχθυοτροφής $\text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ για την τιλάπια καλύπτουν τις ανάγκες 25 φυτών μαρουλιού m^{-2} (Lennard, 2012b).

Το μαρούλι είναι το πιο ευρέως καλλιεργούμενο είδος στην ενυδραιοπονία, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Maucieri et al., 2017). Ωστόσο, η απόδοση του μαρουλιού ποικίλει σημαντικά καθώς εξαρτάται από παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την καλλιέργεια, η πυκνότητα φύτευσης, τα είδη των εκτρεφόμενων ψαριών και η ιχθυοπυκνότητα. Η προσθήκη Fe και K, στην παρούσα διατριβή ευνόησε την παραγωγή νωπής και ξηρής βιομάζας, τον αριθμό των φύλλων και τη συνολική φυλλική επιφάνεια, χωρίς να διαφοροποιείται το ύψος και η ειδική μάζα φύλλων. Η συμπλήρωση Fe+K ήταν η πιο αποτελεσματική εισροή, αυξάνοντας το νωπό βάρος των φύλλων, του υπέργειου και ξηρού βάρους των ριζών κατά 2,1–2,2 φορές σε σύγκριση με την ομάδα Control, και επιπλέον οδηγώντας σε 90% και 50% υψηλότερη συνολική επιφάνεια φύλλου έναντι του Control και της ομάδας Fe αντίστοιχα. Η συνολική απόδοση του μαρουλιού για τις μεταχειρίσεις των Control, Fe και Fe+K υπολογίστηκε σε 1,2, 1,5 και 2,6 kg m^{-2} αντίστοιχα. Παρόμοια απόδοση μαρουλιού ποικιλίας Integral στα 2,3 kg m^{-2} έχει αναφερθεί από τους Pantanella et al., (2012), η οποία έφτασε τα 2,8 kg m^{-2} όταν δοκιμάστηκαν υψηλότερες ιχθυοπυκνότητες. Οι Nozzi et al., (2018), με καθημερινές προσθήκες σιδήρου, καλίου και φωσφόρου στο νερό της ενυδραιοπονίας πέτυχαν ακόμη υψηλότερες αποδόσεις μαρουλιού στα 6,13 kg m^{-2} σε σύγκριση με 5,65 kg m^{-2} της υδροπονίας και τα 4,00 kg m^{-2} του ενυδραιοπονικού διαλύματος χωρίς προσθήκες. Η διαφυλλική εφαρμογή του καλίου (K_2SO_4) είχε ευεργετικές επιδράσεις στα φυτά μέντα, ραπανάκι, μαϊντανό και κόλιανδρο, τα οποία βρέθηκαν να φτάνουν σε υψηλότερες αποδόσεις και συσσωρεύουν περισσότερο σίδηρο στους ιστούς τους (Roosta, 2014b).

Αν και πολυάριθμες μελέτες έχουν εξετάσει την απόδοση ανάπτυξης του μαρουλιού σε συστήματα ενυδραιοπονίας λόγω της υψηλής οικονομικής του αξίας και της ευρείας κατανάλωσης του (Yang & Kim, 2019), οι μελέτες για τις λειτουργικές αποκρίσεις των φυτών σχεδόν απουσιάζουν. Η αξιολόγηση της απόδοσης του μαρουλιού μπορεί να δώσει μια άμεση εικόνα της παραγωγικότητας της ενυδραιοπονίας, εντούτοις δεν περιγράφει επαρκώς την απόδοση του συστήματος όταν αλλάζουν δυναμικές μεταβλητές όπως τα θρεπτικά συστατικά του νερού, άρα δεν μπορεί να εντοπίσει περιορισμούς και αδύναμα σημεία. Η παρούσα μελέτη πραγματοποίησε μία σε βάθος αξιολόγηση της λειτουργικής απόκρισης των φυτών που αναπτύσσονται υπό την αναπόφευκτη ανεπάρκεια βασικών θρεπτικών συστατικών σε τέτοια συστήματα, όπως τα Fe και K. Η συγκέντρωση σιδήρου στα φύλλα σχετίζεται στενά με τη συγκέντρωση των χλωροφυλλών, καθώς ο Fe είναι δομικός παράγοντας πολλών ενζύμων που

εμπλέκονται στη βιοσύνθεση τους (Marschner & Marschner, 2012). Στην πραγματικότητα, μια γραμμική σχέση μεταξύ των επιπέδων Fe και χλωροφυλλών έχει αναφερθεί στις υδροπονικές καλλιέργειες, σε αντίθεση με την πιο πολύπλοκη καλλιέργεια στο έδαφος (Larbi et al., 2006b). Επομένως, η ανεπάρκεια σε Fe όταν είναι ήπια αντανακλάται σε μειωμένη συγκέντρωση χλωροφύλλης, αλλά σε πιο σοβαρές περιπτώσεις οδηγεί σε χλώρωση μεταξύ των νεύρων αλλά και σε νεκρωτικές κηλίδες. Η συμπλήρωση σιδήρου στο παρόν πείραμα αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση της *chl a* σε σύγκριση με αυτή των φυτών Control. Τα τελευταία δεν εμφάνισαν ορατά συμπτώματα χλώρωσης, αν και η συγκέντρωση του Fe στα φύλλα τους ήταν 40% χαμηλότερη από τις άλλες δύο ομάδες. Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης *b* και καροτενοειδών δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων, παρότι μία τάση για χαμηλότερες τιμές στο Control ήταν εμφανής. Η έλλειψη K και Fe μείωσε συνολικά τις φωτοσυνθετικές χρωστικές, επιβεβαιώνοντας πλήρως τις προηγούμενες μελέτες (Morales et al., 2000; Roosta et al., 2018; Zhao et al., 2001), αλλά όχι όλες στον ίδιο βαθμό. Η βιοσύνθεση της *chl a* ήταν πιο ευαίσθητη από τη *chl b* και τα *car* στα φυτά του Control με αποτέλεσμα τη μείωση των αναλογιών *chl a/b* και *chls/car* που δηλώνουν υψηλότερη σχετική περιεκτικότητα σε *chl b* και *car* αντίστοιχα. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ενδεικτικό της ανάγκης να ενισχυθεί η ικανότητα φωτοσυλλογής των φυτών στο Control ως ένας πιθανός μηχανισμός για την εξισορρόπηση της μείωσης της *chl a*. Η ανεπάρκεια σε σίδηρο σε φύλλα αχλαδιάς επηρέασε αρνητικά την συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών σύμφωνα με τους Morales et al., (2000), όπου η μειωμένη αναλογία *chls/car* αποδόθηκε σε αύξηση των ξανθοφυλλών, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την θερμική απόσβεση της περίσσειας ενέργειας. Οι Roosta et al., (2018) ανέφεραν επίσης ότι η ανεπάρκεια σε Fe στο μαρούλι οδήγησε σε μεγαλύτερη μείωση τη συγκέντρωση της *chl a* σε σύγκριση με τη *chl b* και το *car*, ενώ σε προηγούμενη εργασία των Roosta & Mohsenian, (2012) που καλλιέργησαν πιπεριές σε ενυδρείοπνία ανέφεραν ότι η προσθήκη Fe ευνόησε τη βιοσύνθεση της *chl a* και των *car*, αλλά δεν επηρέασε τη *chl b*.

Οι παράμετροι ανταλλαγής αερίων και ο φθορισμός της *chl a in vivo* μετρούνταν σε εβδομαδιαία βάση, επιτρέποντας τη λεπτομερή παρακολούθηση των επιπτώσεων της κάθε μεταχείρισης στην φωτοσυνθετική συσκευή. Η δεύτερη εβδομάδα της καλλιέργειας φάνηκε να είναι το κρίσιμο χρονικό σημείο για την αφομοίωση του CO₂ στα φυτά Control, όπως αποδεικνύεται τόσο από τις καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως, όσο και από τις μετρήσεις σε σταθερή ένταση φωτός. Κατά την δεύτερη εβδομάδα παρατηρήθηκε η τάση για χαμηλότερες τιμές και διατηρήθηκε έτσι μέχρι το τέλος του πειράματος. Αντίθετα, οι ομάδες Fe και Fe+K διατηρήθηκαν σε υψηλά επίπεδα και με παρόμοια επίπεδα φωτοσυνθετικής ικανότητας. Αυτό ίσχυσε μέχρι την τελευταία μέτρηση, στην οποία

παρατηρήθηκε μείωση, που πιθανώς να συνδέεται με την χαμηλότερη g_s ή συμβάντα που σχετίζονται με την ηλικία των φυτών. Τα φυτά Control υστερούσαν σε όλες τις παραμέτρους της ανταλλαγής αερίων, γεγονός που συνδέεται τόσο με την ανεπάρκεια καλίου όσο και με αυτή του σιδήρου. Οι χαμηλοί ρυθμοί φωτοσύνθεσης στα Control μπορεί να σχετίζονται με την μείωση της χλωροφύλλης, αλλά και τη μειωμένη φωτοχημική απόδοση του PSII. Σημαντικό ρόλο επίσης μπορεί να έχουν αρκετές διεργασίες και χαρακτηριστικά που δεν αξιολογήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η χαμηλή, για παράδειγμα, αποτελεσματικότητα καρβοξυλίωσης της Rubisco, η μειωμένη έκφραση του γονιδίου Rubisco, ή μειώσεις στον αριθμό των φωτοσυνθετικών μονάδων ανά επιφάνεια μπορεί να ευθύνονται για τις χαμηλές φωτοσυνθετικές αποδόσεις σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία (Larbi et al., 2006b; Zhao et al., 2001). Η φωτοσύνθεση επηρεάστηκε περισσότερο από ότι η διαπνοή, γεγονός που συμβαίνει σε περιπτώσεις ανεπάρκειας σιδήρου (Larbi et al., 2006b), όπου οι στοματικοί περιορισμοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τελική φωτοσυνθετική απόδοση.

Οι μειώσεις της φωτοχημικής απόδοσης του PSII λόγω έλλειψης σιδήρου και καλίου ήταν μια σημαντική επίδραση στα φυτά μαρουλιού στο Control. Καταγράφηκαν σημαντικές μειώσεις στις κβαντικές αποδόσεις, την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς ηλεκτρονίων και τις ενεργειακές ροές στα φυτά του Control σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα. Ο δείκτης συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης (PI_{total}) μειώθηκε στα φυτά του Control, ένα αποτέλεσμα που θα πρέπει να αναλυθεί περαιτέρω σε σχέση με το PSII και το PSI καθώς το PI_{total} προκύπτει από τέσσερις διαφορετικούς παράγοντες. Η μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοχημείας του PSII, που υποδεικνύεται από τον λόγο F_v/F_m , και η ανά φωτόνιο απόδοση της ροής ηλεκτρονίων μέσω του PSII στους ενδιάμεσους φορείς (ϕE_o) άρχισαν να μειώνονται σημαντικά στα φυτά του Control ήδη από την 14^η ημέρα του πειράματος. Αυτά τα δεδομένα αποκαλύπτουν προοδευτικά αυξανόμενους περιορισμούς στη γραμμική ροή των ηλεκτρονίων κατά μήκος του PSII. Σε αντίθεση με την μειωμένη λειτουργία του PSII, οι παράμετροι που σχετίζονται με το PSI των φυτών του Control παρουσίασαν ενδιαφέρουσες αυξήσεις. Η αύξηση του δR_o , δηλαδή της πιθανότητας κινητοποίησης των ηλεκτρονίων από τους ενδιάμεσους φορείς έως τους τελικούς αποδέκτες του PSI, μαζί με το σχετικό απόθεμα των τελικών υποδοχέων e^- του PSI ($1/V_I$) και την γενικότερη απόδοση του PSI υποδεικνύουν ένα καλά λειτουργικό, ανεπηρέαστο από τις ανεπάρκειες των θρεπτικών συστατικών PSI. Ανάλογα αποτελέσματα βρέθηκαν στην ντομάτα που αναπτύχθηκε σε έλλειψη Fe και K, η οποία είχε αντίκτυπο στη μείωση της αναλογίας μεταξύ του αριθμού των ενεργών κέντρων αντίδρασης PSII και PSI (Kalaji et al., 2014). Όλα τα παραπάνω ευρήματα υποδεικνύουν μια κατωτερότητα του PSII στα φυτά του Control, όσον

αφορά τόσο την απόδοση μεταφοράς ηλεκτρονίων όσο και τη δέσμευση ενέργειας διέγερσης από τα ανοιχτά κέντρα αντίδρασης PSII, τα οποία πιθανόν συνδέονται με την απώλεια *chl* μετά τις πρώτες ημέρες του πειράματος. Σχετικές μελέτες, σε μια προσπάθεια να εξηγήσουν τη μειωμένη δραστηριότητα του PSII, υποδεικνύουν ότι η έλλειψη σε Fe και K προκαλεί φωτοανασταλτική βλάβη στο PSII (Kalaji et al., 2014; Roosta et al., 2018). Οι ροές ενέργειας που μετρήθηκαν στο Control μπορούν να ερμηνευτούν υπό αυτό το πρίσμα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα Control διπλασίασαν την απορροφώμενη ενέργεια, εμφάνισαν 50% αύξηση στην συλληφθείσα ενέργεια, αλλά ταυτόχρονα υπέστησαν πενταπλάσια αύξηση της ενέργειας θερμικής απόσβεσης, εκφραζόμενες όλες ανά RC. Το αυξημένο ABS/RC έχει συνδεθεί με απενεργοποιημένα RCs του PSII κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας που χάνεται ως θερμότητα σε συνθήκες ανεπάρκειας θρεπτικών (Kalaji et al., 2014; Morales et al., 2000; Roosta et al., 2018). Σύμφωνα με το πλαίσιο που θέτουν οι παραπάνω συγγραφείς, οι προαναφερθείσες μειώσεις στην περιεκτικότητα σε *chl*, στο ρυθμό φωτοσύνθεσης και στην αποτελεσματικότητα του PSII του Control μπορούν να θεωρηθούν μηχανισμοί ρύθμισης της λειτουργίας της φωτοσυνθετικής συσκευής σε χαμηλότερα επίπεδα (down-regulation). Αυτό διότι πρέπει να προστατευτεί από οξειδωτική βλάβη η ολοένα και πιο προβληματική δομικά και λειτουργικά φωτοσυνθετική συσκευή του Control. Επιπλέον, ένας παράλληλος μηχανισμός ανάδρασης πιθανώς να υπάρχει μεταξύ της φωτοχημικής απόδοσης και χαμηλής δραστηριότητας των αποδεκτών φωτοσυνθετικών προϊόντων (sink strength), με το τελευταίο να παραπέμπει στην μειωμένη βιομάζα των Control σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K.

Η ανάλυση της θρεπτικής σύστασης των φύλλων του μαρουλιού επιβεβαίωσε τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Fe και K στα φυτά της μεταχείρισης Control. Τα επίπεδα τους ήταν προφανώς πάνω από τα όρια για τη εμφάνιση συμπτωμάτων τροφοπενίας, όμως αρκετά χαμηλά ώστε να εμποδίζουν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και να επιδρούν αρνητικά στην ανάπτυξη. Ο στοχευμένος εμπλουτισμός του θρεπτικού διαλύματος με Fe και K βελτίωσε και τις δύο διαδικασίες, καθώς αντικατοπτρίστηκε και στα επίπεδα των αντίστοιχων θρεπτικών των φύλλων. Γενικότερα, το μαρούλι δεν είναι ένα ιδιαίτερα απαιτητικό φυτό όσον αφορά τα επίπεδα ανόργανων θρεπτικών στο διάλυμα. Οι Delaide et al., (2016) ανέφεραν ότι η τετραπλάσια αύξηση της συγκέντρωσης NO_3^- -N στο νερό της υδροπονίας σε σύγκριση με την ενυδραιοπονία οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα στο μαρούλι και στις δύο τεχνικές καλλιέργειας. Ωστόσο, η διαφυλλική εφαρμογή K, Mg, Fe, Mn, Zn και Cu αντανakλάται σε αυξημένες συγκεντρώσεις, οι οποίες μετριάζουν τις ανεπάρκειες των θρεπτικών συστατικών στα φύλλα τομάτας που καλλιεργούνται στην ενυδραιοπονία (Roosta & Hamidpour, 2013). Η

προσθήκη Fe έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει σημαντικά την ανάπτυξη μέσω αύξησης της περιεκτικότητας σε Fe, K, Ca και Mg των φύλλων πιπεριών σε ενυδρειοπνικά συστήματα (Roosta & Mohsenian, 2012). Τα δεδομένα που ελήφθησαν στην παρούσα διατριβή επιβεβαιώνουν εν μέρει αυτά τα αποτελέσματα, καθώς αυξήθηκαν οι συγκεντρώσεις σε Ca και Mg των φύλλων που έλαβαν Fe αλλά το ίδιο αποτέλεσμα δεν καταγράφηκε στην ομάδα Fe+K. Η περιεκτικότητα σε Mn των φύλλων μαρουλιού ήταν χαμηλότερη στα Control λόγω της έλλειψης σιδήρου και της ανταγωνιστικής σχέσης των δύο θρεπτικών συστατικών. Επιπρόσθετα, οι συνδυασμοί Fe-Zn και Fe-Cu εμφανίζουν ανταγωνισμούς για μεταφορείς και πρωτεΐνες δέσμησης, με αποτέλεσμα η έλλειψη σιδήρου στα φύλλα να οδηγεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις Zn, Cu και ιδιαίτερα Mn (Rai et al., 2021). Ωστόσο, η θρεπτική ανάλυση των φύλλων μαρουλιού που δεν έλαβαν συμπληρωματική λίπανση δεν επιβεβαίωσε καμία από τις παραπάνω εκτιμήσεις. Στην πραγματικότητα, η περιεκτικότητα σε Zn και Cu παρέμεινε ανεπηρέαστη, ενώ το Mn παρουσίασε έναν αξιοσημείωτο τριπλασιασμό στις ομάδες που έλαβαν σίδηρο. Αν και τα αποτελέσματα ήταν ανάλογα με αυτά που λήφθησαν στην περίπτωση διαφυλλικής χορήγησης σιδήρου σε φυτά σόγιας σε καλλιέργεια στο έδαφος (Moosavi & Ronaghi, 2011), οι μετρήσεις του παρόντος πειράματος δεν επέτρεψαν μια εύλογη εξήγηση, επιβεβαιώνοντας ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών θρεπτικών συστατικών είναι ένα σύνθετο, πολυεπίπεδο φαινόμενο.

Η ανεπάρκεια Fe αλλά και K συνδέονται με οξειδωτική καταπόνηση λόγω συσσώρευσης ενεργών μορφών οξυγόνου (Reactive Oxygen Species, ROS) (Kabir et al., 2020; Patel et al., 2022). Οι αντιοξειδωτικοί αμυντικοί μηχανισμοί των φυτών, συμπεριλαμβανομένων των μη ενζυμικών και ενζυμικών συστημάτων, μπορούν να αντιμετωπίσουν τις αρνητικές επιπτώσεις των ROS στη φωτοσυνθετική συσκευή και την ακεραιότητα των μεμβρανών. Στην παρούσα μελέτη, η αντιοξειδωτική ικανότητα όλων των ομάδων μαρουλιού κατά την πειραματική περίοδο έδειξε έντονη ανοδική τάση ιδιαίτερα μέχρι την 30^η ημέρα, αντανακλώντας πιθανώς ένα αναπτυξιακό πρότυπο. Μικρές αλλά στατιστικά σημαντικές μειώσεις καταγράφηκαν στα Control σε σύγκριση με τις άλλες ομάδες σε αυτήν την χρονική περίοδο, η οποία ξεκίνησε την ημέρα 20. Προηγούμενες έρευνες σχετικά με την ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών αποδεικνύουν ότι μια παρατεταμένη περίοδος μειωμένης διαθεσιμότητας τους ευνοεί τη συσσώρευση ROS, καθώς ο ρυθμός παραγωγής των τελευταίων υπερβαίνει το ρυθμό αποτοξικοποίησής τους λόγω της ανεπαρκούς αντιοξειδωτικής δράσης του φυτού (Molassiotis et al., 2006; Patel et al., 2022). Αξιοσημείωτο είναι ότι η οξειδωτική βλάβη που προκαλείται από την έλλειψη Fe είναι πιο εμφανής καθώς ο Fe είναι ένας συμπαράγοντας ή σημαντικό συστατικό των κύριων αντιοξειδωτικών ενζύμων (Kabir et al.,

2020). Η συνδυασμένη έλλειψη Fe και K ενίσχυσε την αναποτελεσματικότητα της αντιοξειδωτικής άμυνας στο Control, ενώ αντίστοιχη αντίδραση είχε και η ομάδα Fe λόγω μειωμένου K, με αποτέλεσμα τη στατιστικά σημαντική μείωση της αντιοξειδωτικής ικανότητας στο τέλος σε σύγκριση με την ομάδα Fe+K. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το χρονικό σημείο της ημέρας 20 συμπίπτει με την έναρξη της πτώσης της φωτοσυνθετικής ικανότητας στα φυτά Control και των σχετικών προβλημάτων στη λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής. Οι δύο αυτές διαδικασίες μπορεί να σχετίζονται με το αντιοξειδωτικό προφίλ αυτής της ομάδας φυτών, καθώς σε συνθήκες προβληματικής λειτουργίας των κέντρων αντίδρασης, το μοριακό O₂ δρα ως εναλλακτικός δέκτης ηλεκτρονίων και ενέργειας που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη φωτοχημεία, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των ROS.

2.4. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη εφαρμόζοντας την προσέγγιση «ελάχιστων δυνατών εισροών» σε συστήματα ενυδρειοπονίας απέδειξε ότι αν και η προσθήκη Fe διατηρεί υψηλούς ρυθμούς φωτοσύνθεσης και λειτουργικότητας της φωτοσυνθετικής συσκευής χωρίς συμπτώματα καταπόνησης, η συμπληρωματική προσθήκη K είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της μέγιστης απόδοσης του μαρουλιού. Τα φυτά Control παρουσίασαν ανεπάρκεια σε Fe, K και Mn, η οποία επέδρασε αρνητικά σε όλες τις μετρούμενες βιοχημικές και φυσιολογικές παραμέτρους, συγκεκριμένα στην ανταλλαγή αερίων, απόδοση της φωτοσυνθετικής συσκευής, περιεκτικότητα σε φωτοσυνθετικές χρωστικές, αντιοξειδωτική ικανότητα και ανάπτυξη. Το κρίσιμο χρονικό σημείο για την εμφάνιση αυτών των αλλαγών ήταν η 14^η ημέρα του πειράματος, με τη φωτοσύνθεση και τον φθορισμό της *chl a* να είναι οι πρώτες διεργασίες που επηρεάζονται. Αυτή η πρόμη ένδειξη καταπόνησης επιβεβαιώνει τη αναγκαιότητα της μελέτης των λειτουργικών αποκρίσεων των φυτών και του ρόλου τους στον εντοπισμό των περιορισμών και των αδύναμων σημείων του ενυδρειοπονικού συστήματος. Οι δυναμικές αλλαγές της λειτουργίας και ανάπτυξης του μαρουλιού στην παρούσα μελέτη οδηγούν σε πρακτικά συμπεράσματα και προτάσεις που αφορούν τη διαχείριση των εισροών ανόργανων θρεπτικών σε συστήματα ενυδρειοπονίας όταν έχει τεθεί ο διπλός στόχος της διατήρησης του μειωμένου οικολογικού αποτυπώματος με ταυτόχρονη υψηλή παραγωγικότητα των καλλιεργειών.

Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου δημοσιοποιήθηκαν στο διεθνές επιστημονικό συνέδριο Aquaculture Europe 2019, European Aquaculture Society (EAS), Βερολίνο:

Tsoumalakou, E., Mente, E., Katsoulas, N., Kormas, K.A., Berillis, P., Vlahos, N., Kapsis, P., Stathopoulou, P. and Levizou, E. (2019). Nutrient input in a small scale aquaponic system: effect on lettuce functional responses and tilapia growth. Aquaculture Europe 2019, Berlin, Germany, 7-10 October

Επίσης, δημοσιοποιήθηκαν σε μορφή άρθρου στο επιστημονικό περιοδικό Agriculture

Tsoumalakou, E.; Mente, E.; Kormas, K.A.; Katsoulas, N.; Vlahos, N.; Kapsis, P.; Levizou, E. Precise Monitoring of Lettuce Functional Responses to Minimal Nutrient Supplementation Identifies Aquaponic System's Nutrient Limitations and Their Time-Course. Agriculture 2022, 12, 1278. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081278>

3. Καλλιέργεια σπανακιού

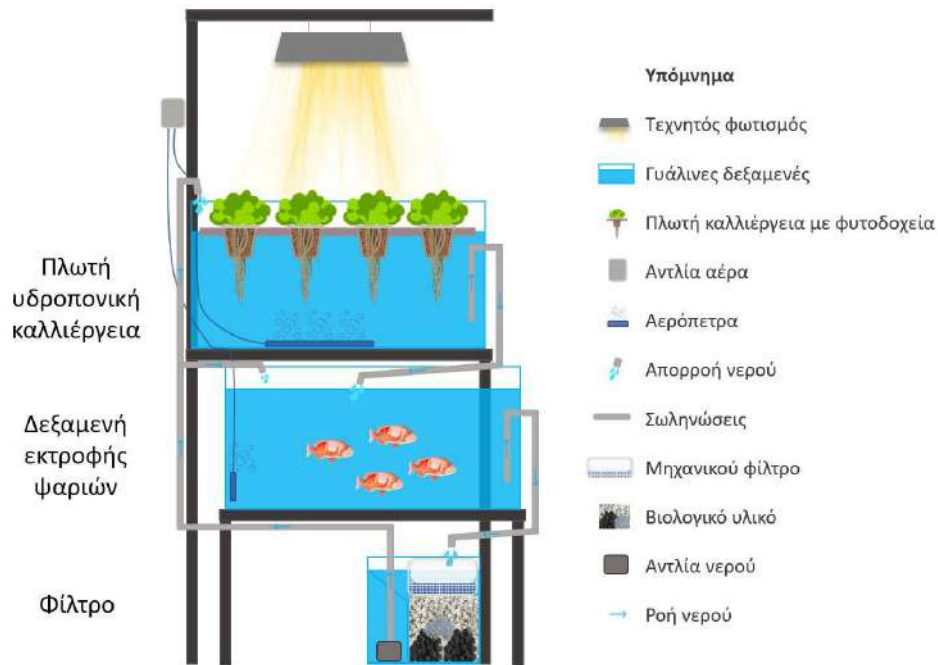
3.1. Υλικά και μέθοδοι

3.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στον ίδιο εργαστηριακό χώρο με το πείραμα του μαρουλιού κάτω από τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 45 σπανάκια (*Spinacia oleracea* var. Virofly) στο στάδιο των τεσσάρων αληθινών φύλλων και 90 κόκκινες τιλάπιες (*Oreochromis spp.*). Η συγκαλλιέργεια των φυτών και ψαριών πραγματοποιήθηκε σε εννέα αυτόνομα ενυδρειοπονικά συστήματα εργαστηριακής κλίμακας, διαφορετικά από αυτά του μαρουλιού, σε κάθετη διάταξη (Εικόνα 14), όπως περιγράφονται παρακάτω. Συνολικά δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα λίπανσης με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση (κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα αποτελούσε και μία επανάληψη). Οι μεταχειρίσεις που μελετήθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- (α) Control (Μάρτυρας), ενυδρειοπονικό διάλυμα χωρίς προσθήκη θρεπτικών συστατικών,
- (β) Fe, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου χορηγήθηκε συμπλήρωμα σιδήρου,
- (γ) Fe+K, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου προστέθηκαν σίδηρος και κάλιο.

Η ποσότητα σε Fe και K που προστέθηκε υπολογίστηκε σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις-στόχους θρεπτικών συστατικών για το σπανάκι και τα φυλλώδη λαχανικά στην υδροπονία και συγκεκριμένα ήταν $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ για τον Fe και 11mmol L^{-1} για το K (Sonneveld & Voogt, 2009; Vandam et al., 2017). Τα θρεπτικά συστατικά που συμπληρώθηκαν στο θρεπτικό διάλυμα ήταν Fe-DTPA (GEOLIX EPE, Chelated Iron DTPA 11%) και θεικό κάλιο (HONEYWELL FLUKA, K_2SO_4). Η πρώτη προσθήκη θρεπτικών συστατικών πραγματοποιήθηκε πέντε ημέρες μετά τη μεταφύτευση των φυτών σπανακιού στο σύστημα, ώστε να φυτά να έχουν ανακάμψει από πιθανή καταπόνηση από την διαδικασία της μεταφύτευσης. Η καλλιέργεια διήρκεσε 45 ημέρες, έως ότου τα φυτά έφτασαν στο εμπορεύσιμο μέγεθος. Οι εργαστηριακές συνθήκες παρέμειναν σταθερές χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου κλίματος (Opticlimat, μοντέλο 15.000 PRO3 και PRO4) που διατηρούσε τη θερμοκρασία του χώρου στους $21,84 \pm 0,09^\circ\text{C}$ και τη σχετική υγρασία στο $57,13 \pm 0,61\%$.



Εικόνα 14. Σχηματική απεικόνιση πλάγιας όψης ενός αυτόνομου ενυδρειοπονικού συστήματος.

3.1.2. Συστήματα ενυδρειοπονίας

Κάθε αυτόνομο ενυδρειοπονικό σύστημα (Εικόνα 14) είχε συνολική χωρητικότητα νερού 135 L (ωφέλιμος όγκος νερού 100L) και αποτελούνταν από τρεις υπομονάδες σε κάθετη διάταξη: μια πλωτή υδροπονική κλίνη φυτών (54 L και επιφάνεια 0,18 m²) στην κορυφή, μία δεξαμενή εκτροφής ψαριών (54 L) στην μέση και ένα φίλτρο τύπου sump (27 L) στην βάση. Όλες οι δεξαμενές κατασκευάστηκαν από γυαλί και συνδέονταν μεταξύ τους με πλαστικές σωληνώσεις (5 L). Η εξωτερική επιφάνεια όλων των γυάλινων δεξαμενών καλύφθηκε από μεμβράνη πλαστικού διπλού χρώματος (μαύρη εσωτερικά και λευκή εξωτερικά) για την αποφυγή ανάπτυξης φυκιών.

Το νερό έρεε από τη δεξαμενή ψαριών στο φίλτρο μέσω της βαρύτητας. Το φίλτρο διαχωρίστηκε σε τρία υπομέρη, στο μηχανικό και στο βιολογικό φίλτρο και στην αντλία νερού, ενώ όλα τα μέρη του φίλτρου επικοινωνούσαν μεταξύ τους. Το πρώτο παρείχε μηχανικό φιλτράρισμα μέσω ενός πλαστικού διχτυού καλυμμένου με παχιά στρώματα (10 cm) από υαλοβάμβακα και σφουγγάρια (EHEIM, χοντρό αφρώδες επίθεμα φίλτρου) για την συγκράτηση των στερεών αποβλήτων και πιθανή ύπαρξη υπολειμμάτων τροφής. Το βιολογικό φίλτρο αποτελούνταν από κεραμικούς δακτυλίους 4 L (SERA, siporax, 15 mm), βιόσφαιρες 2 L (36 mm) και 1 L κυλινδρικό υπόστρωμα K1 Kaldness media (11 mm) αποικισμένων από βακτήρια (PRODIBIO, Biodigest) για την νιτροποιητική διαδικασία. Στο τελευταίο μέρος του φίλτρου τοποθετήθηκε μία αντλία (SUNSUN, 22 W, 1000 L h⁻¹, 0,55 kg) που οδηγούσε το

φιλτραρισμένο θρεπτικό διάλυμα στο σύστημα. Η παροχή του νερού ρυθμίστηκε στα $Q = 182 \text{ L h}^{-1}$ και η ανακυκλοφορία του νερού στο σύστημα ολοκληρωνόταν επτά φορές ανά ώρα.

3.1.3. Θρεπτικό Διάλυμα

Οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού (θερμοκρασία, pH, διαλυμένο οξυγόνο και EC) παρακολουθούνταν τακτικά κατά τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιώντας φορητούς αισθητήρες (HACH, HQ40d και CRISON, CM35) στο μέσο της δεξαμενής των ψαριών. Η θερμοκρασία του νερού διατηρήθηκε στους $22,75 \pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ χρησιμοποιώντας θερμαντήρες (AQUAEL, Ultra heater 100 W) και το διαλυμένο οξυγόνο στα $8,50 \pm 0,02 \text{ mg L}^{-1}$ χρησιμοποιώντας αντλίες αέρα (HAILEA, ACO-328, 70 L min^{-1}). Πραγματοποιήθηκε καθημερινή ανανέωση νερού (5%) με μη χλωριωμένο νερό, τόσο για την διατήρηση του pH σε ουδέτερες τιμές ($7,44 \pm 0,01$) όσο και για την αναπλήρωση των απωλειών λόγω εξατμισοδιαπνοής και της διαδικασίας απομάκρυνσης των στερεών αποβλήτων από τα ψάρια.

Εβδομαδιαία παρακολουθούνταν τα θρεπτικά συστατικά του νερού στο σημείο εισόδου της υδροπονικής καλλιέργειας. Τα δείγματα αφού φιλτράρονταν από φίλτρο σύριγγας ($0,7 \mu\text{m}$), μετρούνταν αμέσως φωτομετρικά (HACH, DR3900) ως προς τα NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} και Fe χρησιμοποιώντας προ-ζυγισμένα αντιδραστήρια και με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.1.3. Οι απορροφήσεις για τα K, Ca και Na μετρούνταν με φλογοφωτόμετρο (JENWAY, PFP7) και υπολογίζονταν οι συγκεντρώσεις μέσω πρότυπων καμπυλών αναφοράς. Μετά τον υπολογισμό των ελλειμματικών συγκεντρώσεων, τα αντίστοιχα λιπάσματα σιδήρου και καλίου χορηγούνταν στο σύστημα μετά την διάλυση τους σε 2 L μη χλωριωμένου νερού, ενώ η προσθήκη τους πραγματοποιούνταν στην δεξαμενή της αντλίας νερού των συστημάτων.

3.1.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις

Οι κόκκινες τιλάπιες (*Oreochromis spp.*) που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα αναπαράχθηκαν στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου ενυδρείοπονίας και έγινε εκτροφή για έξι μήνες πριν από το πείραμα. Όλες οι αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες διεξήχθησαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Οδηγίας 2010/63/EE της ΕΕ σχετικά με την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς, υπό την επιτήρηση επιστημόνων με πιστοποιητικό FELASA. Για τις ανάγκες του πειράματος, 90 τιλάπιες εγκλιματίστηκαν για 15 ημέρες στις δεξαμενές του συστήματος πριν την έναρξη του πειράματος. Έπειτα από αυτό το χρονικό διάστημα, μετρήθηκαν το βάρος και το μήκος των ψαριών και κατανεμήθηκαν στα εννέα συστήματα ενυδρείοπονίας με τρόπο ώστε τα συνολικά

βάρη ανά ενυδρείο να μην διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά. Ο ακριβής αριθμός ψαριών ανά σύστημα υπολογίστηκε με την εξίσωση της φέρουσας ικανότητας ενός ενυδρείου που προτάθηκε από τον (Hirayama, 1974). Για τους υπολογισμούς μετρήθηκε η οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου και το φορτίο ρύπανσης. Τελικά, σε κάθε σύστημα, εισήχθησαν 10 κόκκινες τιλάπιες, με $5,37 \pm 0,09$ g αρχικού σωματικού βάρους και $7,00 \pm 0,04$ cm μήκος ($1,46 \text{ kg m}^{-3}$). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα ψάρια σιτίζονταν μέχρι κορεσμό έξι ημέρες την εβδομάδα και δύο φορές την ημέρα (10:00 και 16:00) με εμπορική τροφή που περιείχε 47,5% πρωτεΐνη, 6,5% λίπος, 2,0% ινώδεις ουσίες και 6,0% υγρασία (Tetra, Tetra discus, 2 mm). Η ημερήσια κατανάλωση τροφής υπολογίστηκε ζυγίζοντας την ποσότητα της τροφής πριν και μετά τα καθημερινά γεύματα (g day^{-1}). Καθημερινά απομακρύνονταν τα κόπρανα των ψαριών από τις δεξαμενές με σιφονισμό και το μηχανικό φίλτρο καθαριζόταν με νερό βρύσης. Στη μέση και στο τέλος του πειράματος, τα ψάρια αναισθητοποιήθηκαν με μεθανοσουλφονική τρικαΐνη (MS 222, 5 mg L^{-1}) για να μετρηθεί το ακριβές βάρος και το μήκος κάθε ψαριού και να εκτιμηθούν οι ακόλουθες παράμετροι ανάπτυξης:

$$\text{Ποσοστό επιβίωσης, S (\%)} = (\text{Τελικός αριθμός ψαριών} / \text{Αρχικός αριθμός ψαριών}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Αύξηση βάρους, WG (g)} = \text{Τελικό βάρος} - \text{Αρχικό βάρος} \quad (2)$$

$$\text{Ειδικός ρυθμός αύξησης, SGR (\% day}^{-1}\text{)} = ((\ln \text{Τελικό βάρος} - \ln \text{Αρχικό βάρος}) / \text{Χρόνος}) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Συντελεστής μετατρεψιμότητας τροφής, FCR} = \text{Καταναλωθείσα τροφή (g)} / \text{Αύξηση βάρους (g)} \quad (4)$$

3.1.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών

Οι σπόροι σπανακιού βλάστησαν σε σπορεία με χώμα και περλίτη (1:1, v/v) σε θερμοκήπιο. Τα σπορόφυτα στο στάδιο των τεσσάρων αληθινών φύλλων μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για τριήμερη προσαρμογή στις εργαστηριακές συνθήκες πριν από την έναρξη του πειράματος και ποτίζονταν με νερό βρύσης χωρίς περεταίρω λίπανση. Συνολικά 45 φυτά (15 φυτά/μεταχείριση, 5 φυτά/σύστημα) με ίδιο ύψος και αριθμό φύλλων επιλέχθηκαν και κατανεμήθηκαν τυχαία στα εννέα συστήματα ενυδρειοπονίας (28 φυτά m^{-2}). Πριν από την μεταφύτευση τους, οι ρίζες των φυτών ξεπλύθηκαν προσεκτικά με νερό βρύσης για την αφαίρεση του εδάφους. Κάθε υδροπονική καλλιέργεια περιείχε ένα στρώμα διογκωμένης πολυστερίνης (πάχους 2,5 cm) στο οποίο τοποθετήθηκαν πέντε διάτρητα φυτοδοχεία (netpots) (Hydrofarm, $8,3 \times 6,6 \times 5,6$) που πληρώθηκαν με κόκκους λάβας (0,7 cm) για την στήριξη των φυτών. Οι θέσεις των φυτών επιλέχθηκαν προσεκτικά για να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του φωτεινού πεδίου, ενώ παράλληλα προσοχή δόθηκε στην ύπαρξη επαρκούς περιοχής για την μελλοντική ανάπτυξη των φυτών. Πάνω από τα συστήματα τοποθετήθηκαν λαμπτήρες HPS (400 W, Feilo Sylvania Europe Limited, UK) που παρείχαν τεχνητό φως στα φυτά με μέση

ένταση φωτός $427,56 \pm 3,99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (μετρητής PPF, Skye Instruments Ltd., UK). Για τον έλεγχο της φωτοπερίοδου (10 ώρες φως:14 ώρες σκοτάδι) χρησιμοποιήθηκε χρονοδιακόπτης. Για να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση των φυτών λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας από τη λειτουργία των λαμπτήρων, τοποθετήθηκαν μικροί ανεμιστήρες κοντά στις υδροπονικές μονάδες. Έτσι εξασφαλίστηκε η βέλτιστη θερμοκρασία για την ανάπτυξη του σπανακιού, η οποία ελεγχόταν τακτικά με θερμοζεύγος (CONSORT, T651, Consort bvba, Βέλγιο) στο επίπεδο των φύλλων.

3.1.6. Ανάπτυξη φυτών, φυσιολογικές παράμετροι και βιοχημικές αναλύσεις των φυτών

Ο σχεδιασμός του πειράματος είχε ως στόχο τα φυτά να φτάσουν στο εμπορεύσιμο μέγεθος με την ανάλογη διάρκεια της καλλιέργειας, άρα αναμενόταν μια περίοδος καλλιέργειας 45 ημερών. Ωστόσο, η χαμηλή απόδοση των φυτών στο Control είχε ως αποτέλεσμα τον τερματισμό της παρουσίας τους στο πείραμα, θεωρώντας ότι αυτό το γεγονός είναι ένα σημαντικό αποτέλεσμα που περιγράφει από μόνο του τα αδύναμα σημεία του συστήματος. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν δύο συγκομιδές, η 1^η την ημέρα 20 όπου συγκομίστηκαν τα φυτά στην ομάδα Control, ενώ οι ομάδες Fe και Fe+K εμφάνισαν καλή ανάπτυξη με αποτέλεσμα την συνέχιση της καλλιέργειας. Η 2^η συγκομιδή, δηλαδή των φυτών Fe και Fe+K πραγματοποιήθηκε την 45^η ημέρα του πειράματος καθώς τα φυτά έφτασαν στο εμπορεύσιμο μέγεθος.

3.1.6.1. Ανάπτυξη φυτών

Και για τις δύο συγκομιδές των φυτών, η διάμετρος ροζέτας (cm) και η συνολική φυλλική επιφάνεια ανά φυτό (cm^2) αξιολογήθηκε για όλα τα φυτά. Για την μέτρηση τους, λήφθηκαν φωτογραφίες των φυτών όλες από το ίδιο ύψος πάνω από κάθε φυτό ξεχωριστά και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση εικόνας με τη χρήση του λογισμικού (ImageJ, λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ImageJ.net/version. ImageJ 1.51j, ΗΠΑ). Στις ίδιες πειραματικές ημερομηνίες, η ειδική μάζα των φύλλων (LSM, g dm^{-2}) μετρήθηκε σε 5 ώριμα φύλλα ανά μεταχείριση. Το LSM υπολογίστηκε από την ξηρή βιομάζα (80°C για 24 ώρες) δειγμάτων φύλλων με γνωστή επιφάνεια. Την ημέρα 20, τα φυτά του Control συγκομίστηκαν και μετρήθηκε το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους τους (μετά από 48 ώρες στους 80°C). Σε αυτό το χρονικό σημείο και προκειμένου να υπάρξει σύγκριση τους με την ομάδα Control, το υπέργειο ξηρό βάρος για τις ομάδες Fe και Fe+K υπολογίστηκε με βάση τις μετρήσεις LSM και φυλλικής επιφάνειας. Το τελικό ξηρό βάρος των φύλλων στις ομάδες με Fe και Fe+K στη τελική συγκομιδή μετρήθηκε μετά τη διαδικασία ξήρανσης που περιγράφηκε παραπάνω.

3.1.6.2. Συνολική περιεκτικότητα σε chl

Σε εβδομαδιαία βάση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χλωροφύλλης με φορητό μετρητή SPAD 502 (Konica Minolta, Τόκιο, Ιαπωνία) σε τρία φύλλα ανά φυτό (45 επαναλήψεις/ομάδα). Η συγκέντρωση ολικής χλωροφύλλης (chl a+b, $\mu\text{g cm}^{-2}$) υπολογίστηκε μέσω της πρότυπης καμπύλης των τιμών SPAD έναντι της πραγματικής συγκέντρωσης σε chl που προέκυψε από την εκχύλιση των ίδιων περιοχών των φύλλων (όπως περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο του πειράματος μαρουλιού).

3.1.6.3. PRI

Οι εβδομαδιαίες μετρήσεις του δείκτη PRI πραγματοποιούνταν σε ένα ώριμο φύλλο ανά φυτό (15 επαναλήψεις/μεταχείριση) με το όργανο και το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε στο μαρούλι (Ενότητα 2.1.7.2). Επιπλέον λήφθηκαν μετρήσεις κατά τις μεσημεριανές ώρες, τέσσερις ώρες μετά το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού.

3.1.6.4. Φθορισμός chl a *in vivo*

Σε εβδομαδιαία βάση, ο φθορισμός της chl a *in vivo* καταγράφονταν σε ένα ώριμο φύλλο ανά φυτό (15 επαναλήψεις/μεταχείριση), με το όργανο και το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε στο μαρούλι (Ενότητα 2.1.7.3).

3.1.6.5. Φωτοσύνθεση

Ο φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), η στοματική αγωγιμότητα (gs) και ο ρυθμός διαπνοής (E) αλλά και η εξάρτιση της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός καταγράφηκαν σε 6 ώριμα φύλλα/μεταχείριση σπανακιού ανά δέκα ημέρες καλλιέργειας και πριν την τελική συγκομιδή των φυτών. Το όργανο και το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε στις παραπάνω μετρήσεις ήταν όμοια με το πείραμα του μαρουλιού (Ενότητα 2.1.7.4) με την τροποποίηση ότι οι εντάσεις φωτός για τις LCs ήταν οι εξής: 1200, 1000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 και 0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ενώ για τις μετρήσεις με σταθερή ένταση φωτός τα φυτά δέχτηκαν 350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

3.1.6.6. Θρέψη φυτών

Η ανάλυση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών σπανακιού πραγματοποιήθηκε σε 3 δείγματα ξηρού ιστού ανά μεταχείριση που ελήφθησαν κατά τις ημέρες συγκομιδής των φυτών, δηλαδή την 20^η για το Control και την 45^η για τις Fe και Fe+K. Τα όργανα και τα πρωτόκολλα που ακολουθήθηκαν ήταν όμοια με το πείραμα του μαρουλιού (Ενότητα 2.1.7.5).

3.1.6.7. Αντιοξειδωτική ικανότητα

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων του σπανακιού αξιολογήθηκε μέσω της συγκέντρωσης ολικών φαινολικών (300 mg ξηρού ιστού για κάθε δείγμα) και της μεθόδου DPPH (250 mg νωπού ιστού για κάθε δείγμα) με 6 επαναλήψεις/μεταχείριση για τις πειραματικές ημέρες 20 και 45, όπως περιγράφηκε στο πείραμα του μαρουλιού (Ενότητα 2.1.7.6).

3.1.8. Στατιστική ανάλυση

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με one-way ANOVA ακολουθούμενη από post-hoc Tukey test, μετά από έλεγχο της ομοιογένειας και της κανονικής κατανομής των δειγμάτων με τους ελέγχους των Levene και Shapiro–Wilk, αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις όπου δεν ίσχυαν οι παραπάνω προϋποθέσεις τα δείγματα ελέγχθηκαν με μη παραμετρικό έλεγχο Kruskal–Wallis, και ακολουθήθηκε ο έλεγχος Dunn. Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο $p \leq 0,05$ και οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το ελεύθερο λογισμικό JASP v.0.16 (JASP Team 2021 Computer Software).

3.2. Αποτελέσματα

3.2.1. Θρεπτικό διάλυμα

Η συνολική εικόνα των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 8, ενώ οι εβδομαδιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων στο νερό για τα νιτρικά, τον σίδηρο και το κάλιο παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Καταγράφηκαν υψηλότερες τιμές pH και EC στην περίπτωση της μεταχείρισης Fe+K συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η EC ήταν 44 - 46 % υψηλότερη στην περίπτωση όπου προστέθηκε και το κάλιο συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση νιτρικών ήταν παρόμοια καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σε όλα τα ενυδρειοπονικά συστήματα, κοντά στα 100 mg L⁻¹. Όσο για τον σίδηρο, δεν καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, με μόνη εξαίρεση τη χαμηλότερη συγκέντρωση στη ομάδα Fe την ημέρα 28 του πειράματος. Αντίθετα, στην ομάδα Control καταγράφηκαν μηδενικές τιμές σιδήρου στο νερό ήδη από την αρχή του πειράματος μέχρι και την συγκομιδή των φυτών αυτής της ομάδας την ημέρα 20 του πειράματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, η περιεκτικότητα σε κάλιο ήταν χαμηλή και παρόμοια στις ομάδες Control και

Fe, οι οποίες δεν είχαν λάβει συμπλήρωμα καλίου, σε αντίθεση με την ομάδα Fe+K όπου η αυξημένη συγκέντρωση K διατηρήθηκε σταθερή κοντά στο βέλτιστο. Η συγκέντρωση των SO_4^{2-} ήταν σημαντικά υψηλότερη στην ομάδα Fe+K κατά 9,6 και 9,9 φορές συγκριτικά με τις τιμές των ομάδων Control και Fe αντίστοιχα. Τα PO_4^{3-} εμφάνισαν υψηλότερη συγκέντρωση στο Control που ήταν αυξημένη κατά 33 και 30,4 % από τις ομάδες Fe και Fe+K αντίστοιχα, σε αντίθεση με τη συγκέντρωση Ca, ενώ για το Na δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Πίνακας 8. Φυσιολογικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο, εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM (n=120 για pH, n=60 για DO και EC, n=12 για την ομάδα Control και n=21 για τις ομάδες Fe, Fe+K για τα θρεπτικά συστατικά NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Fe, K, Ca^{2+} , Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe+K
pH	7,39 \pm 0,03 ^b	7,41 \pm 0,02 ^b	7,52 \pm 0,02 ^a
DO (mg L ⁻¹)	8,58 \pm 0,04 ^a	8,44 \pm 0,04 ^b	8,49 \pm 0,03 ^b
EC (μ S cm ⁻¹)	1247,40 \pm 14,68 ^b	1294,35 \pm 14,04 ^b	2288,88 \pm 49,23 ^a
NH_3 (mg L ⁻¹)	0,04 \pm 0,01 ^b	0,08 \pm 0,01 ^{ab}	0,09 \pm 0,01 ^a
NO_2^- (mg L ⁻¹)	0,03 \pm 0,01 ^a	0,13 \pm 0,02 ^a	0,14 \pm 0,03 ^a
NO_3^- (mg L ⁻¹)	100,45 \pm 2,54 ^a	104,55 \pm 2,56 ^a	101,83 \pm 3,05 ^a
PO_4^{3-} (mg L ⁻¹)	30,33 \pm 1,74 ^a	20,44 \pm 2,10 ^b	21,70 \pm 1,80 ^b
SO_4^{2-} (mg L ⁻¹)	37,58 \pm 0,34 ^b	36,19 \pm 0,63 ^b	359,38 \pm 30,09 ^a
Fe (mg L ⁻¹)	0,02 \pm 0,01 ^b	1,45 \pm 0,14 ^a	1,49 \pm 0,15 ^a
K (mg L ⁻¹)	5,56 \pm 0,17 ^b	2,08 \pm 0,48 ^c	307,99 \pm 28,66 ^a
Ca^{2+} (mg L ⁻¹)	46,77 \pm 2,97 ^b	53,39 \pm 2,08 ^a	52,85 \pm 1,55 ^a
Na (mg L ⁻¹)	113,46 \pm 2,65 ^a	104,49 \pm 4,41 ^a	109,35 \pm 3,73 ^a

Πίνακας 9. Διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων νιτρικών, σιδήρου και καλίου σε εβδομαδιαία βάση (Μέσοι όροι \pm SEM). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) ενώ η – υποδηλώνει απουσία δεδομένων.

	Ημέρες πειράματος					
	7	14	20	28	35	42
NO_3^- (mg L⁻¹)						
Control	99,45 \pm 3,83 ^a	104,17 \pm 1,15 ^a	109,49 \pm 1,56 ^a	–	–	–
Fe	96,50 \pm 2,04 ^a	97,24 \pm 2,87 ^a	101,22 \pm 5,46 ^a	104,76 \pm 8,23 ^a	117,31 \pm 9,10 ^a	115,24 \pm 6,63 ^a
Fe+K	88,68 \pm 5,15 ^a	95,32 \pm 5,18 ^a	101,37 \pm 5,55 ^a	104,03 \pm 5,55 ^a	115,54 \pm 13,72 ^a	113,17 \pm 3,34 ^a
Fe (mg L⁻¹)						
Control	0,03 \pm 0,019 ^b	0,01 \pm 0,004 ^b	0,01 \pm 0,003 ^b	–	–	–
Fe	2,24 \pm 0,037 ^a	1,62 \pm 0,030 ^a	1,70 \pm 0,045 ^a	1,49 \pm 0,019 ^b	1,63 \pm 0,029 ^a	1,48 \pm 0,043 ^a
Fe+K	2,32 \pm 0,020 ^a	1,62 \pm 0,006 ^a	1,64 \pm 0,027 ^a	1,64 \pm 0,023 ^a	1,66 \pm 0,064 ^a	1,53 \pm 0,035 ^a

	K (mg L ⁻¹)					
Control	5,16 ± 0,26 ^b	6,24 ± 0,25 ^b	5,64 ± 0,17 ^b	–	–	–
Fe	5,19 ± 0,15 ^b	2,94 ± 1,11 ^b	1,26 ± 0,44 ^b	0,08 ± 0,07 ^b	0,62 ± 0,03 ^b	0,08 ± 0,03 ^b
Fe+K	418,07 ± 4,81 ^a	387,44 ± 4,91 ^a	341,85 ± 1,80 ^a	342,42 ± 1,70 ^a	358,44 ± 1,47 ^a	302,25 ± 1,55 ^a

3.2.2. Ανάπτυξη ψαριών

Οι παράμετροι ανάπτυξης των ψαριών αξιολογήθηκαν σε δύο χρονικά σημεία, στις ημέρες 20 και 45. Αν και τα φυτά του Control συγκομίστηκαν από τα συστήματα ενυδρείοπονίας την 20^η πειραματική ημέρα, η εκτροφή των ψαριών στην συγκεκριμένη μεταχείριση συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του πειράματος (ημέρα 45) (Πίνακας 10). Το βάρος των ψαριών διπλασιάστηκε μεταξύ των δύο χρονικών σημείων και το υπολογισμένο WG ήταν σχεδόν 2,5 φορές αυξημένο. Ωστόσο, δεν καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς τις παραμέτρους ανάπτυξης. Επιπροσθέτως, το μήκος των ψαριών και η ημερήσια κατανάλωση τροφής ήταν παρόμοια μεταξύ των ομάδων. Υψηλό ποσοστό επιβίωσης, καθώς και υψηλό SGR και βέλτιστο FCR, ήταν εμφανή σε όλες τις ομάδες και για τα δύο χρονικά σημεία.

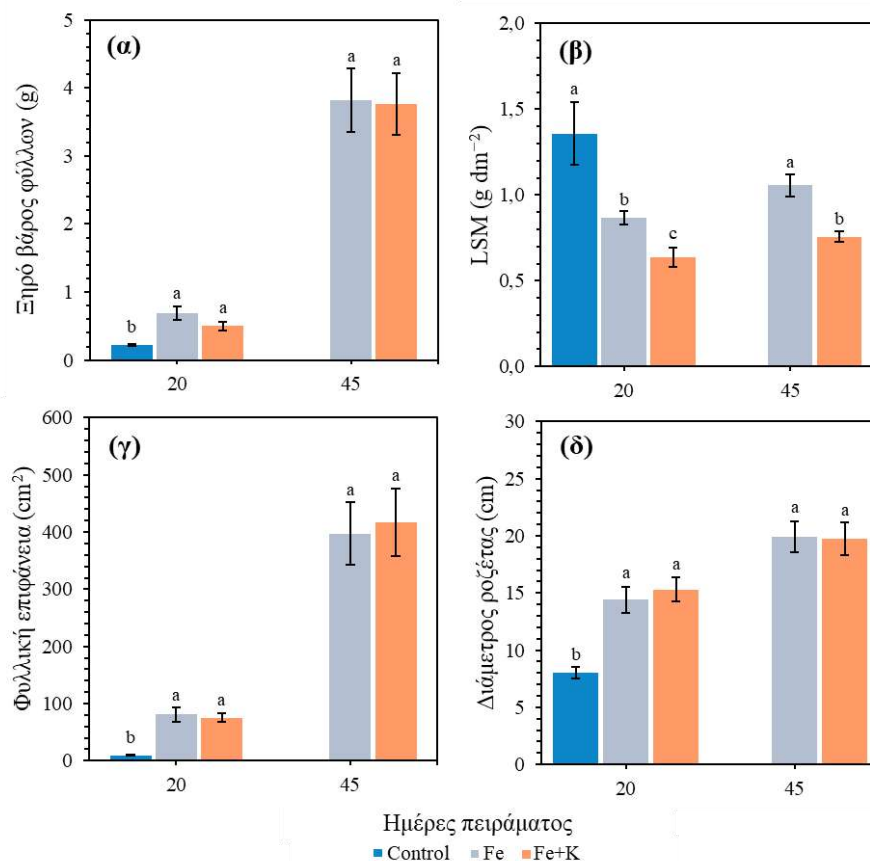
Πίνακας 10. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στις πειραματικές ημέρες 20 και 45 (Μέσοι όροι ± SEM, n=30). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

	Ημέρα 20			Ημέρα 45		
	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K
Βάρος (g)	12,98 ± 0,55 ^a	13,67 ± 0,46 ^a	13,28 ± 0,54 ^a	26,78 ± 1,36 ^a	26,99 ± 1,08 ^a	24,91 ± 1,35 ^a
Μήκος (cm)	9,03 ± 0,13 ^a	9,18 ± 0,10 ^a	9,10 ± 0,10 ^a	11,32 ± 0,17 ^a	11,33 ± 0,15 ^a	11,04 ± 0,15 ^a
Ημερήσια κατανάλωση τροφής (g day ⁻¹)	3,16 ± 0,14 ^a	3,44 ± 0,14 ^a	3,49 ± 0,16 ^a	5,72 ± 0,22 ^a	5,79 ± 0,21 ^a	4,51 ± 0,16 ^a
WG (g)	7,61 ± 0,42 ^a	8,30 ± 0,36 ^a	7,91 ± 0,40 ^a	21,41 ± 1,24 ^a	21,65 ± 0,97 ^a	19,54 ± 1,21 ^a
SGR (% day ⁻¹)	4,33 ± 0,12 ^a	4,65 ± 0,10 ^a	4,48 ± 0,09 ^a	3,51 ± 0,07 ^a	3,57 ± 0,06 ^a	3,35 ± 0,06 ^a
FCR	0,83 ± 0,05 ^a	0,71 ± 0,03 ^a	0,77 ± 0,04 ^a	0,88 ± 0,05 ^a	0,83 ± 0,04 ^a	0,97 ± 0,06 ^a
Επιβίωση (%)	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a	96,67 ^a	100,00 ^a

3.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας σπανακιού

Η ανάπτυξη του σπανακιού όπως καταγράφηκε για τις πειραματικές ημέρες 20 και 45 παρουσιάζεται στο Γράφημα 7. Τα φυτά του Control έδειξαν αξιοσημείωτα μειωμένη ανάπτυξη σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες όσον αφορά τη παραγωγή ξηρής υπέργειας βιομάζας, τη συνολική επιφάνεια των φύλλων και τη διάμετρο ροζέτας που αποτυπώνει την

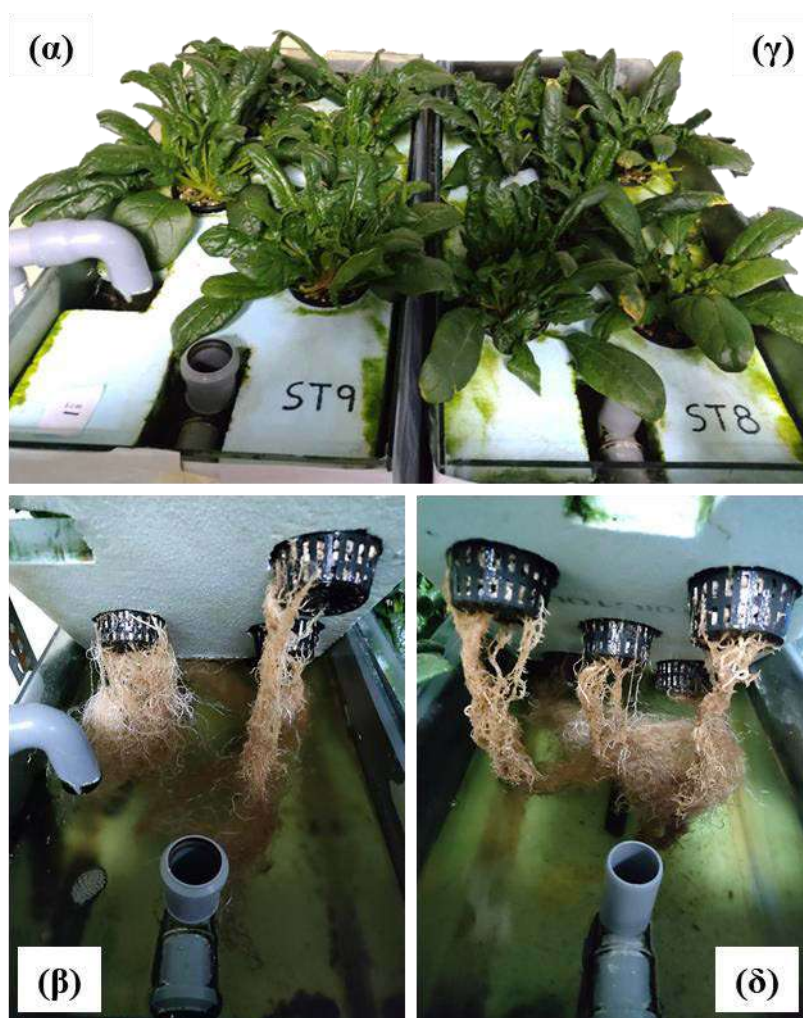
ανάπτυξη του φυτού ως προς τον οριζόντιο άξονα του (Εικόνα 15). Κατά την 1^η συγκομιδή τα Fe και Fe+K φυτά εμφάνισαν κατά 8,7 και 8,2 φορές αυξημένη συνολική επιφάνεια φύλλων και διπλάσια διάμετρο ροζέτας σε σύγκριση με τα Control. Σε όλες τις παραμέτρους ανάπτυξης που προαναφέρθηκαν οι ομάδες Fe και Fe+K εμφάνισαν παρόμοιες τιμές. Ο δείκτης LSM ήταν η μοναδική παράμετρος των φύλλων που υπερέιχε στο Control όπου καταγράφηκαν τα παχύτερα φύλλα, ακολουθούμενα από τα φυτά με προσθήκη Fe, ενώ η ομάδα Fe+K παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές LSM. Όλες αυτές οι διαφορές ήταν στατιστικά σημαντικές μεταξύ τους. Το ίδιο μοτίβο μεταξύ των ομάδων, ως προς τις διαφορές ακολουθήθηκε στην τελική συγκομιδή την ημέρα 45 (Εικόνα 16), όπου η ομάδα Fe διατήρησε σημαντικά υψηλότερο LSM σε σύγκριση με την ομάδα Fe+K, ωστόσο οι τιμές τους δεν μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα από τα μισά του πειράματος και διατηρήθηκαν στα ίδια επίπεδα.



Γράφημα 7. Παράμετροι ανάπτυξης σπανάκιού που καταγράφηκαν τις πειραματικές ημέρες 20 και 45 εκφρασμένες ως Μέσοι όροι \pm SEM ($n=15$). (α) Ξηρό βάρος φύλλων (β) LSM (γ) Φυλλική επιφάνεια (δ) Διάμετρος ροζέτας. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

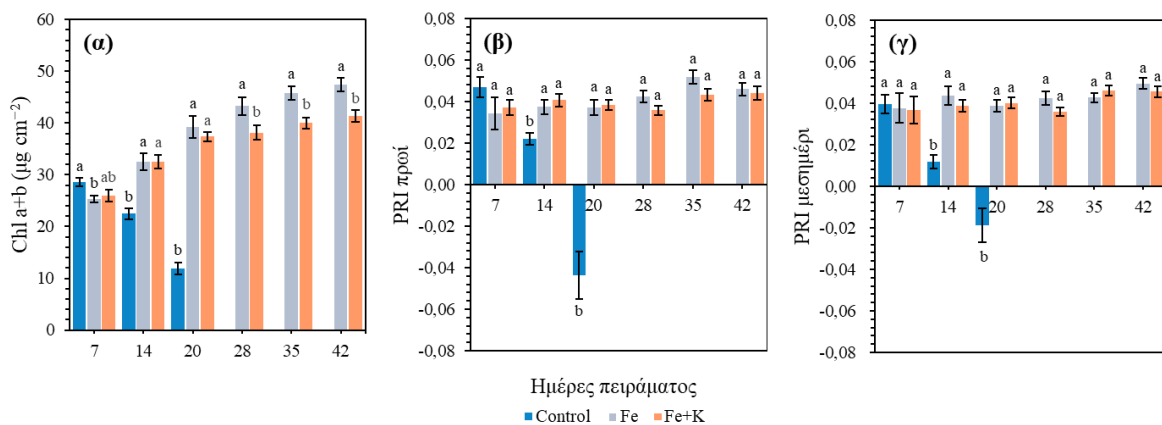


Εικόνα 15. Απεικόνιση των φυτών σπανακιού στα πλώτα συστήματα ενυδρειοπονίας την ημέρα 20 πριν την συγκομιδή της ομάδας Control (δεξιά) σε σύγκριση με την ομάδα Fe (κέντρο) και την ομάδα Fe+K (αριστερά).



Εικόνα 16. Ανάπτυξη φυτών σπανακιού υπέργειο και υπόγειο μέρος των φυτών την 45^η ημέρα του πειράματος και πριν την τελική συγκομιδή (α, β) ομάδα Fe+K, (γ, δ) ομάδα Fe.

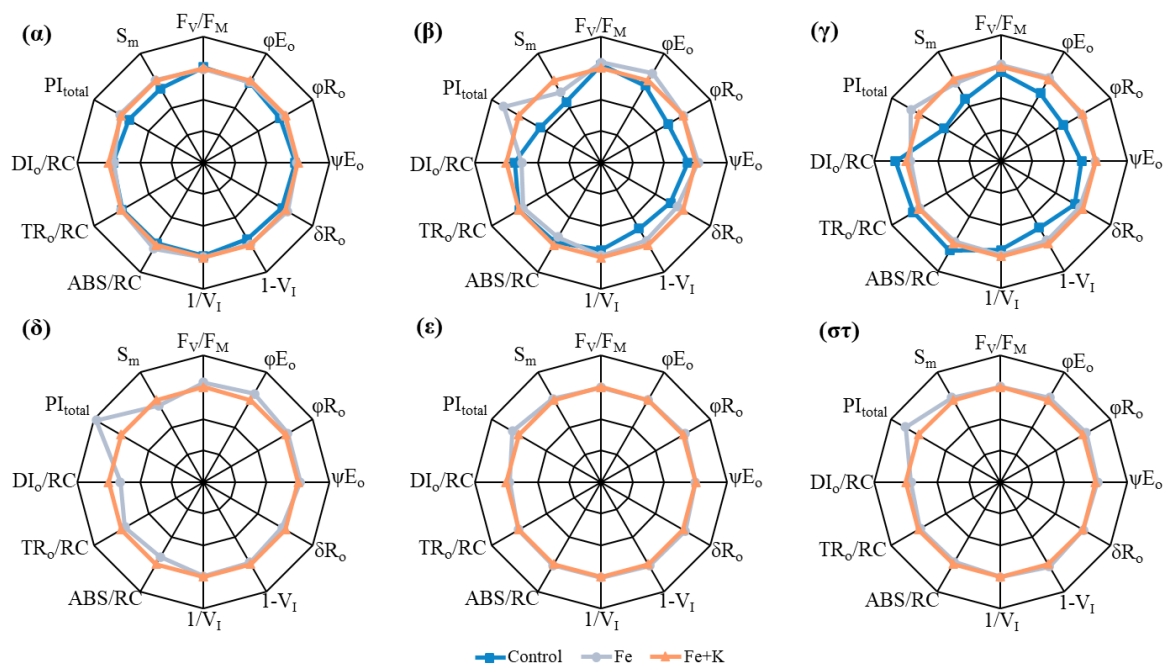
Η συνολική περιεκτικότητα σε chl έδειξε μικρές αλλά στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων στην πρώτη μέτρηση (ημέρα 7), με τα φυτά της ομάδας Control να υπερτερούν (Γράφημα 8α). Ωστόσο, στο Control εμφανίστηκε εκτεταμένη χλώρωση μετά την πρώτη εβδομάδα (οπτικά την ημέρα 10 και αποτυπώθηκε και στο Γράφημα 8α την ημέρα 14). Η χλώρωση επιδεινώθηκε απότομα μέχρι την ημέρα 20, με 75% μείωση της chl σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K. Λόγω αυτού του γεγονότος, η συγκομιδή αυτής της ομάδας κρίθηκε απαραίτητη την πειραματική ημέρα 20. Από το χρονικό σημείο των 28 ημερών μέχρι το τέλος του πειράματος, η ομάδα Fe ξεπέρασε σημαντικά την ομάδα Fe+K στη συγκέντρωση της συνολικής chl. Μια παρόμοια πτωτική τάση με τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης καταγράφηκε στο Control και στον δείκτη ανακλαστικότητας PRI τόσο στις πρωινές όσο και στις μεσημεριανές μετρήσεις (Γράφημα 8β, 8γ). Συγκεκριμένα η πρώτη μείωση παρατηρήθηκε την ημέρα 14 και έγινε εντονότερη την ημέρα 20 όπου και καταγράφηκαν αρνητικές τιμές και για τις δύο μετρήσεις (πρωί και μεσημέρι). Οι ομάδες με προσθήκες θρεπτικών Fe και Fe+K είχαν όμοιες και σταθερές τιμές μεταξύ τους αλλά και κατά την διάρκεια του πειράματος.



Γράφημα 8. Συγκεντρώσεις ολικής χλωροφύλλης και PRI που προέρχονται από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στο σπανάκι (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=15$). (α) Chl a+b (β) PRI πρωί (γ) PRI μεσημέρι. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

Οι παράμετροι του φθορισμού της chl a *in vivo* παρουσιάζονται στο Γράφημα 9. Κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας της καλλιέργειας (Ημέρα 7), η ομάδα Control εμφάνισε χαμηλότερες τιμές στις παραμέτρους που σχετίζονται με το PSI, όπως το απόθεμα των δραστικών κέντρων του PSI ($1-V_I$) και το σχετικό απόθεμα των τελικών υποδοχέων e^- του PSI ($1/V_I$). Έπειτα από μία εβδομάδα (Ημέρα 14), τα αρνητικά αποτελέσματα της μεταχείρισης Control ήταν εμφανή σε όλες τις παραμέτρους φθορισμού. Στατιστικά σημαντικές μειώσεις παρατηρήθηκαν στην ανά φωτόνιο απόδοση της ροής e^- στους ενδιάμεσους φορείς e^- (Φ_{E_0})

και στους τελικούς αποδέκτες του PSI (ϕR_o), των οποίων η κινητική σχετίζεται με το PSII. Επιπλέον, παράμετροι όπως η πιθανότητα κινητοποίησης ροής e^- έως τους ενδιάμεσους φορείς (ψE_o) και από τους ενδιάμεσους έως τους τελικούς αποδέκτες του PSI (δR_o) έδειξαν σημαντική μείωση στο Control σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Επιπροσθέτως, το σχετικό μέγεθος του αποθέματος των πρωτογενών αποδεκτών e^- του PSII (S_m) ήταν 3,2 και 3,7 φορές χαμηλότερο στην ομάδα Control από τα φυτά των ομάδων Fe και Fe+K, αντίστοιχα. Την ημέρα 20, τα αποτελέσματα έδειξαν αυξήσεις της συλληφθείσας ενέργειας (TR_o/RC) και ενέργειας θερμικής απόσβεσης (DI_o/RC) ανά κέντρο αντίδρασης στην ομάδα Control. Στο δεύτερο μισό του πειράματος, η ομάδα Fe εμφάνισε υψηλότερο δείκτη συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης (PI_{total}) σε σχέση με την ομάδα Fe+K, κυρίως λόγω της υψηλότερης ανά φωτόνιο απόδοσης μεταφοράς ηλεκτρονίων, όπως απεικονίζεται από τους δείκτες ϕE_o , ϕR_o και ψE_o στην τελική μέτρηση (Ημέρα 42).

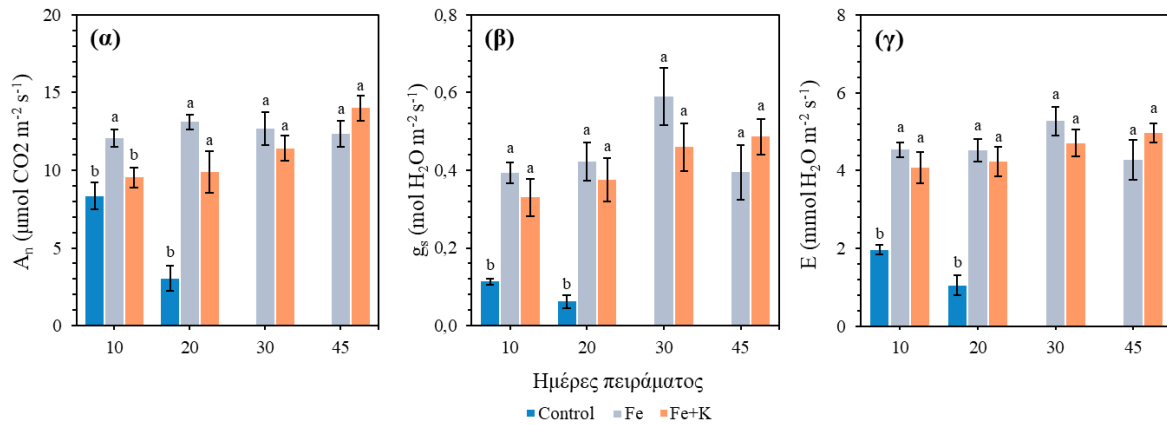


		F_v/F_m	ϕE_o	ϕR_o	ψE_o	δR_o	$1-V_i$	$1/V_i$	ABS/RC	TR_o/RC	DI_o/RC	PI_{total}	S_m
Ημέρες πειράματος	7	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
	14	**	**	*	*	**	*	*	**	**	**	*	**
	20	n.s.	*	*	*	*	*	*	n.s.	*	n.s.	*	*
	28	**	**	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	**	**	**	**	**
	35	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	42	**	**	**	**	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	**	**	n.s.

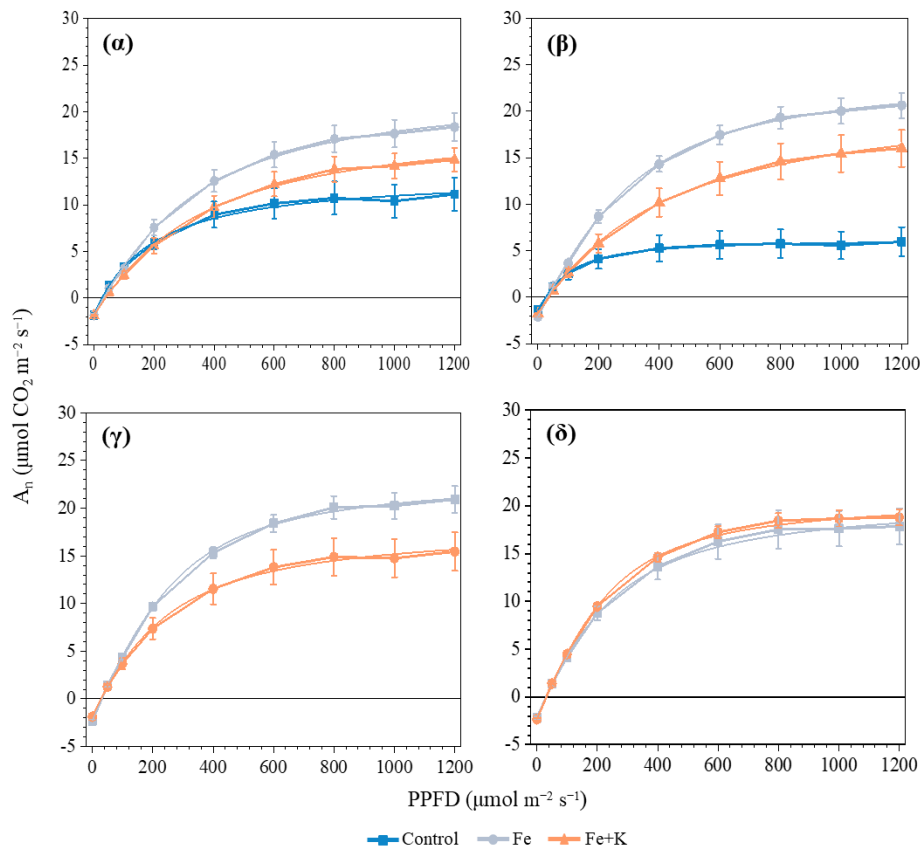
Γράφημα 9. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων των JIP-test που συνάγονται από τις καμπύλες OJIP φθορισμού chl a για το σπανάκι (Μέσοι όροι, $n=15$) για 6 πειραματικές ημέρες. (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 14, (γ) Ημέρα 20, (δ) Ημέρα 28, (ε) Ημέρα 35, (στ) Ημέρα 42. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν σύμφωνα με την μεταχείριση Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων, το * υποδηλώνει διαφορές μεταξύ του Control και των άλλων δύο ομάδων, ενώ το ** υποδηλώνει διαφορές μεταξύ όλων των ομάδων στο $p \leq 0,05$.

Οι μετρήσεις ανταλλαγής αερίων όπως ο φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), η στοματική αγωγιμότητα (g_s) και ο ρυθμός διαπνοής (E) κατέγραψαν σημαντικές μειώσεις από την έλλειψη θρεπτικών συστατικών στην ομάδα Control από το πρώτο δεκαήμερο της καλλιεργητικής περιόδου (Γράφημα 10). Συγκεκριμένα, στα μέσα της καλλιέργειας η A_n ήταν κατά 4,3 και 3,3 φορές μεγαλύτερη στις ομάδες Fe και Fe+K αντίστοιχα. Η g_s ήταν 6,8 και 6,1 φορές χαμηλότερη στην ομάδα Control συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Επιπλέον, η E ακολούθησε το ίδιο πρότυπο και τελικά ήταν 4,3 και 4,0 φορές χαμηλότερος στην ομάδα Control σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις Fe και Fe+K αντίστοιχα. Οι ομάδες με επιπλέον προσθήκες θρεπτικών εμφάνισαν ικανοποιητικά υψηλό ρυθμό φωτοσύνθεσης καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Οι LCs που αποτυπώθηκαν επίσης σε δεκαήμερη βάση παρουσιάζονται στο Γράφημα 11. Μια πρόωμη ένδειξη της κατωτερότητας της φωτοσυνθετικής απόδοσης των φυτών Control εμφανίστηκε μετά από δέκα ημέρες καλλιέργειας και απεικονίστηκε σε σημαντικά χαμηλότερο A_{max} (Γράφημα 11α) σε σύγκριση με την ομάδα Fe. Οι διαφορές μεγιστοποιήθηκαν την ημέρα 20 (Γράφημα 11β), όπου το A_{max} ήταν 3,3 και 2,7 φορές χαμηλότερος στο Control σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K αντίστοιχα, σε συνδυασμό με σημαντικά μειωμένο Rd. Την αντίστοιχη πειραματική ημέρα, το A_{max} του Control ήταν σχεδόν στο μισό της τιμής που κατέγραψε την ημέρα 10 και επιτεύχθηκε σε χαμηλές τιμές PPF, δηλαδή ήδη από τα 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ Fe και Fe+K, η πρώτη έδειξε μια μη σημαντική, αλλά σαφή τάση για ενισχυμένες A_{max} και Rd, και οι όποιες διαφορές εξαλείφθηκαν στην τελική μέτρηση του πειράματος (Ημέρα 45) (Γράφημα 11δ). Και οι δύο ομάδες με προσθήκες λιπασμάτων εμφάνισαν υψηλές τιμές και είχαν σχεδόν σταθερή πορεία στη φωτοσυνθετική τους απόκριση στο αυξανόμενο φως σε όλη την πειραματική περίοδο. Η ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) που εξήχθη από αυτές τις καμπύλες δεν έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.



Γράφημα 10. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το σπανάκι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).



Ημέρες πειράματος	A_{max}			α			Rd		
	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K
10	13,23 \pm 1,94 ^b	21,30 \pm 1,72 ^a	17,85 \pm 1,27 ^{ab}	0,065 \pm 0,009	0,056 \pm 0,006	0,046 \pm 0,005	-1,70 \pm 0,21 ^a	-1,78 \pm 0,18 ^a	-1,75 \pm 0,12 ^a
20	7,42 \pm 1,71 ^b	24,01 \pm 1,75 ^a	19,35 \pm 2,15 ^a	0,057 \pm 0,009	0,064 \pm 0,005	0,047 \pm 0,007	-1,38 \pm 0,13 ^a	-2,02 \pm 0,17 ^b	-1,66 \pm 0,13 ^{ab}
30	–	24,28 \pm 1,76 ^a	18,10 \pm 2,29 ^a	–	0,073 \pm 0,002	0,059 \pm 0,007	–	-2,21 \pm 0,22 ^a	-1,72 \pm 0,18 ^a
45	–	20,81 \pm 2,17 ^a	21,77 \pm 1,07 ^a	–	0,073 \pm 0,002	0,073 \pm 0,002	–	-2,10 \pm 0,16 ^a	-2,22 \pm 0,13 ^a

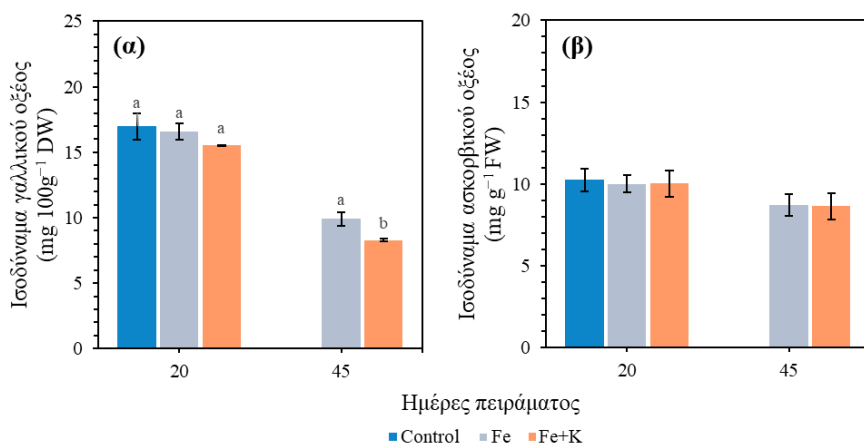
Γράφημα 11. Καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός (Light curves) για το σπανάκι κατά τη διάρκεια του πειράματος (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). (α) Ημέρα 10. (β) Ημέρα 20. (γ) Ημέρα 30. (δ) Ημέρα 45. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα.

Η θρεπτική σύσταση των φύλλων του σπανακιού παρουσιάζεται στον Πίνακα 11. Τα φυτά Control εμφάνισαν σημαντικά μειωμένες συγκεντρώσεις N, P, K, Fe και Zn. Στα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά, τα φυτά Control και Fe+K παρουσίασαν παρόμοιες συγκεντρώσεις. Μόνο η περιεκτικότητα σε K και Mg στα φύλλα σπανακιού διέφερε στατιστικά σημαντικά μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με Fe+K είχαν 4,0 και 2,9 φορές περισσότερο K από τις ομάδες Control και Fe αντίστοιχα, ωστόσο είχαν και σημαντικά λιγότερο Mg από τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με επιπλέον Fe. Παράλληλα στην ομάδα Fe καταγράφηκαν παρόμοιες συγκεντρώσεις Zn και Mn σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Η προσθήκη σιδήρου και στις δύο ομάδες που ελέγχθηκαν είχε ως αποτέλεσμα 2,8 και 2,4 φορές αυξημένη συγκέντρωση σιδήρου σε σύγκριση με την ομάδα Control. Στην ομάδα Fe+K καταγράφηκε σημαντικά χαμηλότερη συγκέντρωση Na κατά 5,0 και 4,5 φορές συγκριτικά με τις ομάδες Control και Fe αντίστοιχα.

Πίνακας 11. Θρεπτική σύσταση σπανακιού μετά τη συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=3$). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως $mg\ g^{-1}$ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).

		Control	Fe	Fe+K
%	N	3,02 \pm 0,06 ^b	4,58 \pm 0,14 ^a	4,28 \pm 0,06 ^a
	P	0,43 \pm 0,07 ^b	0,63 \pm 0,03 ^{ab}	0,65 \pm 0,02 ^a
	K	2,53 \pm 0,06 ^b	3,49 \pm 0,71 ^b	10,06 \pm 0,37 ^a
	Ca	1,35 \pm 0,07 ^{ab}	1,93 \pm 0,36 ^a	0,95 \pm 0,04 ^b
	Mg	1,03 \pm 0,05 ^b	1,60 \pm 0,17 ^a	1,04 \pm 0,03 ^b
ppm	Fe	27,61 \pm 0,06 ^b	76,83 \pm 5,94 ^a	66,25 \pm 2,70 ^a
	Zn	48,02 \pm 0,06 ^a	60,99 \pm 7,67 ^a	54,88 \pm 1,20 ^a
	Mn	29,56 \pm 0,07 ^a	45,72 \pm 9,91 ^a	26,49 \pm 3,60 ^a
	Cu	8,24 \pm 0,06 ^a	6,13 \pm 0,14 ^b	5,03 \pm 0,44 ^b
$mg\ g^{-1}$	Na	12,97 \pm 0,93 ^a	11,57 \pm 2,56 ^a	2,57 \pm 0,91 ^b

Η εκτίμηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας του σπανακιού έδειξε ότι τα φυτά Fe υπερτερούσαν των Fe+K ως προς τη συγκέντρωση ολικών φαινολικών στην τελική συγκομιδή (Ημέρα 45) (Γράφημα 12). Πριν από αυτό το σημείο, οι συγκεντρώσεις ολικών φαινολικών ήταν συγκρίσιμες μεταξύ των μεταχειρίσεων. Επιπλέον, τα ισοδύναμα ασκορβικού οξέος που προέκυψαν από την μέθοδο DPPH ήταν σταθερά κατά τη διάρκεια του πειράματος και παρόμοια μεταξύ των ομάδων και για τα δύο χρονικά σημεία που μετρήθηκαν.



Γράφημα 12. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων σπανακιού κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νεπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

3.3. Συζήτηση

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των συστημάτων ενυδραιοπονίας είναι ότι οι απαιτήσεις των φυτών για άζωτο και φώσφορο μπορούν να καλυφθούν αποκλειστικά από τα θρεπτικά συστατικά που προέρχονται από την εκτροφή των ψαριών λόγω της ανακύκλωσης του νερού (Schneider et al., 2005). Η διαθέσιμη ποσότητα αυτών των θρεπτικών συστατικών για την απορρόφηση από τα φυτά σχετίζεται με τον αριθμό των εκτρεφόμενων ψαριών, τα είδη των καλλιεργούμενων φυτών και ψαριών, τον ρυθμό και την ποσότητα εισροής της ιχθυοτροφής (Knaus & Palm, 2017b). Στα ενυδραιοπονικά συστήματα, τα μεταβολικά προϊόντα των ψαριών περιέχουν επίσης θρεπτικά συστατικά, όπως Fe και K, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες και μη ισορροπημένες σε σύγκριση με μία υδροπονική καλλιέργεια, επομένως, ανεπαρκείς για την υποστήριξη της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών (Kasozzi et al., 2019). Στην παρούσα έρευνα, η συγκέντρωση νιτρικών κυμάνθηκε κοντά στα 100 mg L^{-1} και ήταν όμοια μεταξύ των μεταχειρίσεων και σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Μια επαρκής συγκέντρωση NO_3^- στο θρεπτικό διάλυμα για το σπανάκι στην ενυδραιοπονία κυμαίνεται από 80 έως 200 mg L^{-1} (Atique et al., 2022; Thomas et al., 2019). Το ίδιο εύρος νιτρικών ιόντων προτείνεται και από τους Petrea et al., (2013) για την καλλιέργεια σπανακιού στην ενυδραιοπονία. Στην εργασία τους, καταγράφηκαν ισχυρές διακυμάνσεις στη συγκέντρωση NO_3^- -N που σχετίζονται με τους διαφορετικούς ρυθμούς απορρόφησης των φυτών, την απόδοση των νιτροποιητικών βακτηρίων εντός του βιολογικού φίλτρου και την

ποσότητα της χορηγούμενης τροφής προς τα ψάρια. Στην παρούσα μελέτη, οι συγκεντρώσεις Fe και K στο θρεπτικό διάλυμα διατηρήθηκαν κοντά στις τιμές-στόχους στις αντίστοιχες ομάδες για την κάλυψη των αναγκών των φυτών, αντίθετα τα φυτά Control αντιμετώπισαν σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις Fe. Το αποτέλεσμα αυτό συμβαδίζει με σχετικές ενυδρειοπονικές εργασίες όπου μελετήθηκαν φυλλώδη λαχανικά όπως το σπανάκι, η ρόκα και το μαρούλι (Sonneveld & Straver, 1994; Stathoroulou et al., 2021; Tsoumalakou et al., 2022). Στα αντίστοιχα δεδομένα λοιπόν αποδεικνύουν ότι οι σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις Fe αποτελούν ένα σημαντικό αδύναμο σημείο του συστήματος για την καλλιέργεια αυτής της κατηγορίας των φυτών.

Η ανάπτυξη της τιλάπιας δεν επηρεάστηκε από την προσθήκη Fe και K στα συστήματα παρουσιάζοντας υψηλά ποσοστά επιβίωσης (97–100%) για όλες τις ομάδες. Τα οφέλη από την χρήση της τιλάπιας στην ενυδρειοπονία έγκειται στην προσαρμοστικότητα του είδους σε ένα ευρύ φάσμα αβιοτικών συνθηκών και στη διατήρηση υψηλών ποσοστών επιβίωσης ακόμη και με μεγάλες εισροές λιπασμάτων για την κάλυψη των αναγκών των φυτών (Rafiee et al., 2019; Ru et al., 2017; Silva et al., 2015). Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε μια αρχική πυκνότητα εκτροφής ψαριών $1,46 \text{ kg m}^{-3}$ για να καλύψει τις ανάγκες των φυτών και η υπολογισμένη ημερήσια εισροή ιχθυοτροφής ανά καλλιεργητική περιοχή κατά τη διάρκεια του πειράματος κυμάνθηκε από 18 έως 32 g m^{-2} . Σύμφωνα με τον Lennard, (2012b), μια ποσότητα 13 g ιχθυοτροφής m^{-2} ημέρα⁻¹ για την τιλάπια καλύπτει τις διατροφικές ανάγκες για το μαρούλι σε μια καλλιέργεια με πυκνότητα φύτευσης 25 φυτά m^{-2} . Όσον αφορά το SGR της παρούσας εργασίας, οι τιμές κυμάνθηκαν από 3,4 έως 4,7 % ημέρα⁻¹, και οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν κατά το πρώτο μισό του πειράματος (0–20 ημέρες). Αυτές οι τιμές SGR ήταν υψηλότερες από αυτές των Rayhan et al., (2018) (2,6 – 3,7 % ημέρα⁻¹) για νεαρά άτομα τιλάπιας που εκτρέφονταν κάτω από διαφορετικές ιχθυοπυκνότητες σε ενυδρειοπονία με το σπανάκι *Basella alba*. Οι Stathoroulou et al., (2021), δουλεύοντας με συμπληρώματα Fe και K σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας για την συγκαλλιέργεια ρόκας-τιλάπιας, ανέφεραν ότι οι εισροές λιπασμάτων σε παρόμοιες συγκεντρώσεις δεν έχουν επιπτώσεις στην επιβίωση και την ανάπτυξη των ψαριών, και επιπλέον δεν προκαλούν αξιοσημείωτες ιστολογικές αλλοιώσεις.

Η ανάπτυξη και οι λειτουργικές αποκρίσεις του σπανακιού στις διαφορετικές μεταχειρίσεις λίπανσης που δοκιμάστηκαν σχετίζονται άμεσα με τη θρέψη των φυτών, επομένως, θα συζητηθούν συνδυαστικά. Τα σχεδόν μηδενικά επίπεδα σιδήρου σε συνδυασμό με τα χαμηλά επίπεδα καλίου στο νερό είχαν αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη του σπανακιού στο Control. Μετά από μια περίοδο καλλιέργειας 10 ημερών, τα φυτά εμφάνισαν χλώρωση στα νεαρά φύλλα, ενώ τελικά νέκρωση των ιστών των φύλλων παρατηρήθηκε λίγες μέρες

αργότερα. Αυτά τα συμπτώματα είναι ενδεικτικά της ανεπάρκειας σιδήρου (Kasozzi et al., 2019; Kosegarten et al., 1998), η σοβαρότητα της οποίας επιβεβαιώθηκε από τη θρεπτική ανάλυση του φυτικού ιστού. Η τελευταία εμφάνισε και σημαντικά μειωμένη συγκέντρωση N, P, K και Zn στο Control, σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Ως αποτέλεσμα, η συγκομιδή αυτής της ομάδας πριν το τέλος της καλλιέργειας κρίθηκε απαραίτητη καθώς τα φυτά δεν παρουσίαζαν σημάδια ανάκαμψης και η καταπόνηση τους ήταν ραγδαία εξελισσόμενη. Κατά την συγκομιδή λοιπόν της 20^{ης} ημέρας πειράματος, η παραγωγή βιομάζας φύλλων, η διάμετρος της ροζέτας και η συνολική επιφάνεια φύλλων ήταν σημαντικά χαμηλότερες στο Control, φθάνοντας έως και 8 φορές μείωση στην τελευταία παράμετρο σε σύγκριση με τα φυτά των άλλων ομάδων που μελετήθηκαν. Αντίθετα, η ομάδα Control εμφάνισε αυξημένο δείκτη LSM, που υποδηλώνει παχύτερα φύλλα και πιο συμπαγή μεσόφυλλο. Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι οι αλλαγές στην επένδυση βιομάζας ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να οφείλονται σε θρεπτική καταπόνηση και σχετίζονται κυρίως με αλλαγές στην πυκνότητα (density) των φύλλων (Poorter et al., 2009). Στις περιπτώσεις χαμηλής διαθεσιμότητας θρεπτικών στοιχείων σε επίπεδα που μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη, παρεμποδίζεται η αύξηση του μεγέθους των κυττάρων, με τελικό αποτέλεσμα τον σχηματισμό μικρότερων φύλλων με υψηλότερες τιμές LSM (Witkowski & Lamont, 1991). Η ανάπτυξη του μαρουλιού με παρόμοιο πειραματικό πρωτόκολλο επιβεβαιώνει τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, καθώς αναφέρθηκε διπλάσια μείωση στην τελική απόδοση των φυτών που αναπτύχθηκαν απουσία επιπλέον θρεπτικών, σε σύγκριση με την ομάδα που έλαβε επιπλέον σίδηρο και κάλιο (Tsoumalakou et al., 2022). Μια πρόσφατη εργασία των Levine & Mattson, (2021) έδειξε ότι η προσθήκη καλίου σε ένα εύρος συγκέντρωσης 58 – 244 mg L⁻¹ στην υδροπονία ευνόησε το νωπό βάρος, την φυλλική επιφάνεια και την ειδική επιφάνεια των φύλλων σπανακιού σε σύγκριση με τα μηδενικά επίπεδα αυτού του θρεπτικού. Επιπλέον, η παρασκευή ιχθυοτροφών για την ενυδρείοπονία με πρόσθετα θρεπτικά μελετάται ολοένα και περισσότερο για να καλύψει τις ανάγκες της λίπανσης των φυτών και παράλληλα να παρέχει τη βέλτιστη διατροφή στους εκτρεφόμενους υδρόβιους οργανισμούς (Robaina et al., 2019). Για παράδειγμα, η χρήση ιχθυοτροφής με συμπλήρωμα σιδήρου-αμινοξέων για την τιλάπια του Νείλου, το χρυσόψαρο και το αφρικανικό γατόψαρο μεγιστοποίησε την απόδοση ανάπτυξης του σπανακιού και η βέλτιστη περιεκτικότητα ήταν 20 – 30 g Fe kg⁻¹ τροφής, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση Fe στο θρεπτικό διάλυμα ήταν 2,24 έως 2,90 mg L⁻¹ (Rono et al., 2018).

Η εκτεταμένη χλωρώση των φυτών στην ομάδα Control, ήταν εμφανής ήδη από την δεύτερη εβδομάδα της καλλιέργειας και επιδεινώθηκε μέχρι την ημέρα 20. Η γρήγορη μείωση της περιεκτικότητας σε ολικές χλωροφύλλες μπορεί να αποδοθεί άμεσα στην ανεπάρκεια

θρεπτικών στοιχείων, ιδιαίτερα σε Fe, N και Mg (Kalaji et al., 2018; Roosta et al., 2018). Μια γραμμική σχέση μεταξύ του Fe και της συγκέντρωσης chl των φύλλων έχει καταγραφεί και στην υδροπονία (Larbi et al., 2006b), προφανώς λόγω του γεγονότος ότι ο Fe είναι συστατικό των ενζύμων που συμμετέχουν στη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης. Φαίνεται ότι το χρονικό σημείο των 20 ημερών είναι κρίσιμο για τη διαμόρφωση της πορείας βιοσύνθεσης/αποδόμησης της chl σε περιπτώσεις καλλιέργειας φυτών στην ενυδρειοπονία χωρίς περαιτέρω προσθήκες λιπασμάτων, αφού παρόμοια απόκριση αναφέρθηκε για το μαρούλι (Tsoumalakou et al., 2022) και τη ρόκα (Tsoumalakou et al., 2022) που καλλιεργήθηκαν με παρόμοια πρωτόκολλα λίπανσης.

Τα χαμηλά επίπεδα χλωροφυλλών δεν μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικούς φωτοσυνθετικούς ρυθμούς, προκαλώντας μείωση της αποδοτικότητας χρήσης του φωτός (LUE), δηλαδή της απόδοσης με την οποία απορροφάται η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιομάζας (Vanikiotis et al., 2021). Στα φύλλα σπανακιού της ομάδας Control, η προαναφερθείσα σχέση επιβεβαιώθηκε από την έντονη πτωτική τάση του PRI, δείκτη που σχετίζεται άμεσα με την LUE. Εκτός από τις συνεχώς χαμηλότερες τιμές του PRI στο Control σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες, καταγράφηκαν επίσης αρνητικές τιμές τόσο στις πρωινές (σκοτεινή φάση) όσο και στις μεσημεριανές μετρήσεις την Ημέρα 20. Η μειωμένη φωτοσυνθετική χρήση του φωτός πιθανώς είναι ένας συνδυασμός τόσο της μειωμένης περιεκτικότητας των φύλλων σε chl όσο και της λειτουργικής βλάβης της φωτοσυνθετικής συσκευής. Αυτό το αποτέλεσμα υποδεικνύει μία σοβαρή και χρόνια καταπόνηση που δεν μπορεί να αρθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η λειτουργική αναποτελεσματικότητα της φωτοσυνθετικής συσκευής επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις ανταλλαγής αερίων και φθορισμού που συζητούνται παρακάτω. Επίσης επιβεβαιώνεται από την αποδεδειγμένη θετική συσχέτιση του PRI με το φωτοσυνθετικό ρυθμό (Filella et al., 2009), την ανά φωτόνιο απόδοση του φωτοσυστήματος II, καθώς και με την αρνητική του συσχέτιση με τη μη φωτοχημική απόσβεση (Yudina et al., 2020). Η προσθήκη Fe και Fe+K διατήρησε σταθερές και παρόμοιες τιμές PRI σε όλο το πείραμα, αν και η προσθήκη μόνο σιδήρου ευνόησε σημαντικά τη συγκέντρωση ολικών chl στο δεύτερο μισό του πειράματος, γεγονός που απεικονίστηκε και στη φωτοσυνθετική απόδοση των αντίστοιχων φυτών.

Η μέτρηση φθορισμού της chl a *in vivo* αποκάλυψε μια έντονα προβληματική λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής του Control, ήδη από την δεύτερη εβδομάδα της καλλιέργειας. Η φωτοχημεία του PSII επηρεάστηκε σημαντικά, με αποτέλεσμα χαμηλότερες ανά φωτόνιο αποδόσεις, μειωμένη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά ηλεκτρονίων και στις

ροές ενέργειας σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K. Η μειωμένη ανά φωτόνιο απόδοση μεταφοράς ηλεκτρονίων κατά μήκος της διαδρομής προς τους τελικούς αποδέκτες μπορεί να συσχετιστεί με το κατά 3 φορές μειωμένο απόθεμα των πρωτογενών αποδεκτών e^- (Q_A) του PSII (S_m) που καταγράφηκε στην ομάδα Control σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K. Η χρονική εξέλιξη των παραπάνω μειώσεων παραπέμπει σε αυξανόμενους περιορισμούς στην ηλεκτρονιακή ροή κατά μήκος του PSII, γεγονός που ισχύει και για συμβάντα που σχετίζονται με το PSI. Είναι ενδιαφέρον ότι το μαρούλι (Ενότητα 2) που αναπτύχθηκε σε ίδιο πειραματικό πρωτόκολλο εμφάνισε ένα ανεπηρέαστο από την ανεπάρκεια θρεπτικών PSI στα Control, σε αντίθεση με το PSII που υπέστη αρνητικές επιπτώσεις όπως και στο σπανάκι (Tsoumalakou et al., 2022). Στην περίπτωση του σπανακιού, οι περιορισμοί στη φωτοχημεία οδήγησαν σε μειωμένο δείκτη συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης, όπως καταγράφηκε στον δείκτη PI_{total} στην ομάδα Control. Αντίθετα, η προσθήκη Fe και Fe+K βελτίωσε την δραστηριότητα του PSII, όπως αντανάκλαται σε όλες τις παραμέτρους φθορισμού σε όλη την διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί εδώ ότι τα φυτά που δέχτηκαν λίπανση μόνο με Fe ξεπέρασαν και την ομάδα Fe+K ως προς τον δείκτη PI_{total} , επιτυγχάνοντας έτσι βελτιωμένη φωτοχημική απόδοση. Η εικόνα της φωτοχημείας στο σπανάκι που καλλιεργήθηκε χωρίς επιπλέον θρεπτικά μπορεί εν μέρει να εξηγηθεί από την γρήγορη απώλεια χλωροφυλλών όπως καταγράφηκε από τους Jardim et al., (2021) που συνέδεσαν μειώσεις της μέγιστης ανά φωτόνιο απόδοσης του PSII και αυξήσεις της μη φωτοχημικής απόσβεσης με μειωμένα επίπεδα chl και συγκέντρωση K στα φύλλα. Επιπλέον, η μειωμένη φωτοχημική απόδοση του Control μπορεί να σχετίζεται με την προβληματική ανάπτυξη της φωτοσυνθετικής συσκευής που έχει παρατηρηθεί σε περιπτώσεις ανεπάρκειας θρεπτικών, γεγονός που επηρεάζει συνήθως και τα δύο φωτοσυστήματα (Kalaji et al., 2018). Έχει τεκμηριωθεί ότι η ανεπάρκεια σιδήρου και καλίου στο φυτικό ιστό προκαλεί φωτοανασταλτική βλάβη στο PSII (Kalaji et al., 2018; Roosta et al., 2018), γεγονός που απεικονίστηκε ξεκάθαρα στις καμπύλες εξάρτισης της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός και στο παρόν πείραμα. Επιπρόσθετα, οι ανεπάρκειες σε K, Fe και Mn θεωρήθηκαν η αιτία σημαντικών μειώσεων στη μέγιστη απόδοση της φωτοχημείας PSII σε φυτά βασιλικού που καλλιεργήθηκε στην ενυδραιοπονία σε σύγκριση με την υδροπονία σύμφωνα με την έρευνα του (Roosta, 2014a).

Οι καμπύλες εξάρτησης φωτοσύνθεσης από την ένταση του φωτός δίνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη φωτοσυνθετική απόδοση, την κατάσταση και την δυναμική της φωτοσυνθετικής συσκευής σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία του πειράματος, αποτυπώνοντας τις επιπτώσεις από τις μεταχειρίσεις (Herrmann et al., 2020). Τόσο οι στιγμιαίες μετρήσεις ανταλλαγής αερίων, όσο και οι LCs κατέγραψαν την αλλαγή στην φωτοσυνθετική απόκριση

του σπανακιού, πρακτικώς τον εγκλιματισμό της φωτοσύνθεσης στα διαφορετικά πρωτόκολλα λίπανσης. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με Fe κατέγραψαν την μεγαλύτερη φωτοσυνθετική απόδοση, χωρίς όμως στατιστικά σημαντικές διαφορές από την ομάδα Fe+K. Αντίθετα, η συνολική εικόνα του Control κατέδειξε μειωμένη απόδοση αλλά και φωτοσυνθετική ικανότητα. Τα αποτελέσματα αυτά αποτύπωσαν τις αρνητικές επιπτώσεις της ανεπάρκειας θρεπτικών συστατικών στην κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και στην περιεκτικότητα σε chl. Αρκετές μελέτες έχουν συσχετίσει την έλλειψη Fe με μειώσεις στον καθαρό φωτοσυνθετικό ρυθμό, στην στοματική αγωγιμότητα και στον ρυθμό διαπνοής (Larbi et al., 2006b; Tsoumalakou et al., 2022). Επιπλέον, η έλλειψη σιδήρου στα φύλλα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της δραστηριότητας της Rubisco αλλά και του αποθέματος σε κυτόχρωμα *b6/f* (Briat et al., 2015; Larbi et al., 2006b).

Η αντιοξειδωτική ικανότητα, όπως αποτυπώθηκε από την περιεκτικότητα σε ολικά φαινολικά στα φύλλα και την ικανότητα αδρανοποίησης του DPPH, στα μέσα της καλλιέργειας (ημέρα 20) παρέμεινε σε ίδια επίπεδα για όλες τις μεταχειρίσεις, αν και οι αρνητικές επιπτώσεις στη φωτοσυνθετική λειτουργία και ανάπτυξη των Control ήταν ήδη εμφανείς και έντονες. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Jin et al., (2013) για το σπανάκι, που έδειξαν συγκρίσιμα επίπεδα φαινολικών ενώσεων και DPPH στις περιπτώσεις ήπιας έλλειψης και επαρκούς ποσότητας σιδήρου. Εντούτοις, η ανεπάρκεια Fe και K έχει αποδειχτεί ότι προκαλεί συσσώρευση ενεργών μορφών οξυγόνου και επακόλουθη οξειδωτική βλάβη, η οποία επιδεινώνεται από την έκθεση σε μακροχρόνια καταπόνηση (Patel et al., 2022). Στην παρούσα εργασία, η μόνη σημαντική διαφορά βρέθηκε στην τελική συγκομιδή, όπου η προσθήκη K μείωσε την περιεκτικότητα σε ολικά φαινολικά στα φύλλα σπανακιού. Αντίθετα, σε καλλιέργεια φιστικιάς βρέθηκε ότι η μειωμένη χορήγηση K αύξησε τα ολικά φαινολικά (Patel et al., 2022). Σε πείραμα αύξησης της συγκέντρωσης Fe στο θρεπτικό διάλυμα της υδροπονίας από 2 σε 5–15 mg L⁻¹ αναφέρθηκε αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας σε φαινολικές ενώσεις στην ποικιλία σπανακιού «Corvair» (Vaštakaitė-Kairienė et al., 2022). Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα δεν καταγράφηκαν τέτοιου είδους διαφορές λόγω της ίδιας συγκέντρωσης σιδήρου που έλαβαν οι ομάδες Fe και Fe+K.

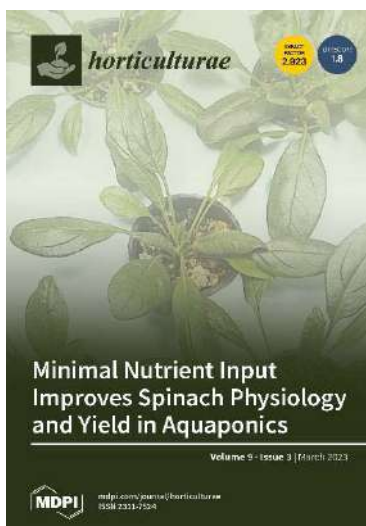
3.4. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη απέδειξε ότι η έλλειψη σιδήρου αποτελεί το πιο σημαντικό αδύναμο σημείο για την καλλιέργεια σπανακιού σε συζευγμένα συστήματα ενυδραιοπονίας χωρίς

εισροές λιπασμάτων. Όλες οι λειτουργικές και αναπτυξιακές παράμετροι που μελετήθηκαν έδειξαν να βελτιώνονται σημαντικά με την προσθήκη σιδήρου και μόνο, καθώς το σπανάκι της μεταχείρισης Fe εμφάνισε παρόμοια ή και καλύτερη απόδοση από την μεταχείριση Fe+K. Αντίθετα, τα φυτά Control αντιμετώπισαν ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών, με τελικό αποτέλεσμα την σημαντικά μειωμένη ανάπτυξη. Σε αυτή οδήγησε μία συντονισμένη μείωση της απορρόφησης φωτός, της αποδοτικότητας της χρήσης του φωτός, της φωτοχημείας και των διαδικασιών καρβοξυλίωσης, τα οποία συνολικά συνδέονται με την πρόωμη απώλεια χλωροφυλλών και πιθανώς με δομικά προβλήματα στην φωτοσυνθετική συσκευή. Οι παραπάνω λειτουργικές αποκρίσεις ήταν ήδη ορατές στα φυτά Control ήδη από την 10^η ημέρα του πειράματος. Η παρούσα εργασία εφάρμοσε και προτείνει την προσέγγιση των ελάχιστων δυνατών εισροών θρεπτικών συστατικών στην ενυδρειοπονική καλλιέργεια σπανακιού. Αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές αποδόσεις, χωρίς να διακυβεύεται το κύριο πλεονέκτημα της ενυδρειοπονίας, δηλαδή η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση θρεπτικών από την εκτροφή των ψαριών, με αποτέλεσμα την ύπαρξη αυξημένης βιωσιμότητας του συστήματος με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου δημοσιοποιήθηκαν στο επιστημονικό συνέδριο Aquaculture Europe 20, European Aquaculture Society (EAS), Διαδικτυακά:

Tsoumalakou E., Mente E., Vlahos N. and Levizou E. (2021) Aquaponics in action: physiological responses of spinach and tilapia growth. Aquaculture Europe 20, April 12-15, p.598-599



Επίσης από τα αποτελέσματα προέκυψε δημοσίευση στο επιστημονικό περιοδικό Horticulture όπου το άρθρο τοποθετήθηκε ως εξώφυλλο του Τεύχους 9 τον Μάρτιο του 2023:

Tsoumalakou, E.; Mente, E.; Vlahos, N.; Levizou, E. Spinach Responds to Minimal Nutrient Supplementation in Aquaponics by Up-Regulating Light Use Efficiency, Photochemistry, and Carboxylation. Horticulturae 2023, 9, 291. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030291>

4. Καλλιέργεια σταμναγκαθιού

4.1. Υλικά και μέθοδοι

4.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον ίδιο εργαστηριακό χώρο ενυδρειοπονίας. Τα εννέα συστήματα εργαστηριακής κλίμακας που περιγράφηκαν στο πείραμα του σπανακιού (ενότητα 3.1) χρησιμοποιήθηκαν και για τη συγκαλλιέργεια σταμναγκαθιού και κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis sp.*). Συνολικά δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα λίπανσης με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση (κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα αποτελούσε και μία επανάληψη). Οι μεταχειρίσεις που μελετήθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- (α) Control (Μάρτυρας), ενυδρειοπονικό διάλυμα χωρίς προσθήκη θρεπτικών συστατικών,
- (β) Fe, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου χορηγήθηκε συμπλήρωμα σιδήρου,
- (γ) Fe+K, ενυδρειοπονικό διάλυμα όπου προστέθηκαν σίδηρος και κάλιο.

Η θερμοκρασία του χώρου διατηρήθηκε σταθερή στους $21,84 \pm 0,10$ °C και η σχετική υγρασία στο $55,71 \pm 0,40\%$ (Opticlimat, μοντέλο 15.000 PRO3 και PRO4, AirSupplies Nederland BV, Ολλανδία). Η προσθήκη Fe και K πραγματοποιήθηκε σε συγκεντρώσεις - στόχους θρεπτικών συστατικών και συγκεκριμένα $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ για τον σίδηρο και $7,50 \text{ mmol L}^{-1}$ για το κάλιο, σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις που βρέθηκαν να είναι αποτελεσματικές σε προηγούμενες καλλιέργειες στο ίδιο ενυδρειοπονικό σύστημα (Tsoumalakou et al., 2023; Tsoumalakou et al., 2022). Οι χημικές μορφές για τα συμπληρώματα θρεπτικών και το πρωτόκολλο χορήγησης και παρακολούθησης των συγκεντρώσεων τους ήταν ίδια με το πείραμα του σπανακιού (ενότητα 3.1).

4.1.2 Θρεπτικό διάλυμα

Το pH μετρούνταν καθημερινά, ενώ το οξυγόνο (DO, mg L^{-1}) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC, $\mu\text{S cm}^{-1}$) μετρούνταν τρεις φορές την εβδομάδα στη μέση των δεξαμενών των ψαριών. Επιπλέον, τα θρεπτικά συστατικά μετρήθηκαν εβδομαδιαία με τα όργανα και τα πρωτόκολλα των μετρήσεων που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.1.3.

4.1.3. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις

Οι κόκκινες τιλάπιες (*Oreochromis spp.*) εκτράφηκαν για έξι μήνες πριν από την έναρξη του πειράματος στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Ενυδρειοπονίας. Όλες οι

αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες διεξήχθησαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Οδηγίας 2010/63/ΕΕ της ΕΕ σχετικά με την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς, υπό την επιτήρηση επιστημόνων με πιστοποιητικό FELASA. Ενενήντα τιλάπιες εγκλιματίστηκαν για 15 ημέρες στις δεξαμενές ενυδρειοπονίας πριν από την έναρξη του πειράματος. Τα νεαρά άτομα κατανεμήθηκαν με βάση το βάρος τους στα εννέα συστήματα. Ο ακριβής αριθμός των ψαριών για κάθε σύστημα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση για τη φέρουσα ικανότητα ενός ενυδρείου που προτάθηκε από τον (Hirayama, 1974). Η εξίσωση εκτιμά τη φέρουσα ικανότητα που προκύπτει από τους ρυθμούς ρύπανσης και την ικανότητα του φίλτρου σε ένα κλειστό σύστημα καλλιέργειας ή ενυδρείο. Για τους υπολογισμούς μετρήθηκε η οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου και το φορτίο ρύπανσης. Τελικά, δέκα κόκκινες τιλάπιες με αρχικό σωματικό βάρος $5,70 \pm 0,16$ g και μήκος $7,00 \pm 0,07$ cm (ιχθυοπυκνότητα $1,46 \text{ kg m}^{-3}$) τοποθετήθηκαν σε κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα ψάρια σιτίζονταν μέχρι κορεσμό έξι ημέρες την εβδομάδα και δύο φορές την ημέρα (10:00 και 16:00). Η σίτιση των ψαριών γινόταν πολύ προσεκτικά ώστε να μην παραμένει στο σύστημα περίσσεια τροφής. Το προαναφερθέν πρόγραμμα σίτισης με μία ημέρα χωρίς σίτιση εφαρμόστηκε αφού η υιοθέτηση σύντομων διατροφικών περιορισμών και προσωρινής νηστείας (δηλαδή, αντισταθμιστική ανάπτυξη) προκαλεί αποδεδειγμένα επιτάχυνση ανάπτυξης, διατηρώντας παράλληλα την ευζωία των ψαριών (Silva et al., 2020). Χρησιμοποιήθηκε η ίδια εμπορική τροφή με τα πειράματα μαρουλιού και σπανακιού (Tetra Discus Granules, 2 mm, Tetra, Spectrum Brands Inc., UK) και η ημερήσια κατανάλωση τροφής μετρήθηκε ζυγίζοντας την ποσότητα της τροφής πριν και μετά τα καθημερινά γεύματα (g day^{-1}). Τα απεκκρίματα των ψαριών απομακρύνονταν καθημερινά με σιφονισμό και το μηχανικό φίλτρο καθαρίζονταν επίσης με νερό βρύσης. Στο τέλος του πειράματος, τα ψάρια αναισθητοποιήθηκαν με μεθανοσουλφονική τρικαΐνη (MS 222, 5 mg L^{-1}) για την καταγραφή του βάρους και μήκους για την περεταίρω εκτίμηση της ανάπτυξης με τις εξισώσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως (Κεφάλαιο 3.1.4.).

4.1.4. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών

Τα φυτά προήλθαν από φυτώριο στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης. Συνολικά, 45 φυτά σταμναγκαθιού με αρχικό βάρος $5,62 \pm 0,47$ g και διάμετρο ροζέτας $15,68 \pm 0,54$ cm κατανεμήθηκαν τυχαία στα εννέα συστήματα (15 φυτά/ομάδα) σε πυκνότητα φύτευσης 28 φυτών m^{-2} και καλλιεργήθηκαν για 35 ημέρες μέχρι να φτάσουν στο εμπορεύσιμο μέγεθος. Κάθε υδροπονική κλίση αποτελούνταν από ένα φύλλο πολυστυρενίου (πάχους 2,5 cm) στο οποίο τοποθετήθηκαν πέντε μαύρα κυλινδρικά διάτρητα φυτοδοχεία (Hydrofarm, $8,3 \times 6,6 \times$

5,6 cm, Hydrofarm Europe, Ισπανία) και γεμίστηκαν με κόκκους λάβας (0,7 cm). Οι λαμπτήρες HPS (400 W, Feilo Sylvania Europe Limited, UK) τοποθετήθηκαν πάνω από τις υδροπονικές μονάδες παρέχοντας στα φυτά μέση ένταση φωτός $362,18 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (μετρητής PPF, Skye Instruments Ltd., UK). Η φωτοπερίοδος ορίστηκε σε 12 ώρες φως:12 ώρες σκοτάδι και ελεγχόταν με χρονοδιακόπτη. Μικροί ανεμιστήρες τοποθετήθηκαν κοντά στις υδροπονικές μονάδες για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των φυτών από τους λαμπτήρες και για τη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας, η οποία παρακολουθούνταν μία φορά την εβδομάδα με θερμοζεύγος (CONSORT, T651, Consort bvba, Βέλγιο).

4.1.5. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών

Κατά την τελική συγκομιδή, η επιφάνεια των φύλλων (cm^2) και η διάμετρος της ροζέτας υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ανάλυση εικόνας που πραγματοποιήθηκε σε φωτογραφίες φυτών από σταθερό ύψος (ImageJ, λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ImageJ.net/version. ImageJ 1.51j, ΗΠΑ). Μετά, τα φυτά χωρίστηκαν σε φύλλα και ρίζες. Ο αριθμός των φύλλων και το νωπό βάρος τους μετρήθηκαν αμέσως. Το ξηρό βάρος των φύλλων και των ριζών προσδιορίστηκε μετά από ξήρανση στους $80 \text{ }^\circ\text{C}$ για 48 ώρες και η αναλογία υπόγειου προς υπέργειου υπολογίστηκε από τα δεδομένα της βιομάζας. Επίσης, υπολογίστηκε ο δείκτης LSM από την ξηρή βιομάζα ($80 \text{ }^\circ\text{C}$ για 24 ώρες) δειγμάτων φύλλων με γνωστή επιφάνεια για έξι φυτά ανά μεταχείριση.

4.1.6. Συνολική περιεκτικότητα σε chl

Η συνολική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη μετρούνταν σε εβδομαδιαία βάση χρησιμοποιώντας φορητό μετρητή χλωροφύλλης SPAD502 (Konica Minolta, Τόκιο, Ιαπωνία) σε τρία φύλλα διαφορετικής ηλικιακής ομάδας ανά φυτό (45 φυτά/ομάδα). Οι τιμές SPAD μετατράπηκαν σε πραγματικές συγκεντρώσεις ολικών χλωροφυλλών (chl a + b) μέσω πρότυπης καμπύλης αναφοράς που κατασκευάστηκε σύμφωνα με την μέθοδο της ενότητας 3.1.6.2.

4.1.7. PRI

Οι μετρήσεις του PRI πραγματοποιούνταν μία φορά την εβδομάδα σε ένα ώριμο φύλλο κάθε φυτού (15 επαναλήψεις/ομάδα) πριν το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού, με το όργανο και το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε στο μαρούλι (Ενότητα 2.1.7.2).

4.1.8. Φθορισμός της χλωροφύλλης *a in vivo*

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης *a* (*chl a*) καταγράφονταν εβδομαδιαία σε ένα ώριμο φύλλο από κάθε φυτό (15 επαναλήψεις/ομάδα) με το όργανο και το πρωτόκολλο που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.1.7.3.

4.1.9. Φωτοσύνθεση

Οι παράμετροι των ανταλλαγών αερίων (A_n , gs, E) καταγράφηκαν σε ώριμα φύλλα (6 επαναλήψεις/ομάδα) τις πειραματικές ημέρες 8, 15, 25 και 35. Η ένταση του φωτός στο εσωτερικό του θαλάμου ρυθμίστηκε στα 340 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Τις ίδιες πειραματικές ημέρες, πραγματοποιήθηκαν επίσης LCs σε ένα ώριμο φύλλο ανά φυτό (4 επαναλήψεις/ομάδα). Το όργανο και το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε στις παραπάνω μετρήσεις ήταν όμοια με το πείραμα του μαρουλιού (Ενότητα 2.1.7.4).

4.1.10. Θρέψη φυτών

Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών στα φύλλα του σταμναγκαθιού προσδιορίστηκαν σε 3 δείγματα/μεταχείριση που προέκυψαν από την ομαδοποίηση ξηρού υλικού ώριμων φύλλων ξεχωριστά για κάθε κλίση. Τα όργανα και τα πρωτόκολλα που ακολουθήθηκαν ήταν όμοια με το πείραμα του μαρουλιού (Ενότητα 2.1.7.5).

4.1.11. Αντιοξειδωτική ικανότητα

Η αντιοξειδωτική ικανότητα αξιολογήθηκε με τη μέθοδο DPPH και της συγκέντρωσης ολικών φαινολικών σε 6 επαναλήψεις/μεταχείριση, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.1.7.6. Για την μέθοδο DPPH, δείγματα ώριμων φύλλων από τις πειραματικές ημέρες 15, 25 και 35 αποθηκεύτηκαν στους $-80\text{ }^\circ\text{C}$ και για κάθε δείγμα χρησιμοποιήθηκαν 150 mg σταμναγκαθιού. Για την μέθοδο των ολικών φαινολικών χρησιμοποιήθηκαν 300 mg ξηρού ιστού για κάθε δείγμα.

4.1.12. Στατιστική ανάλυση

Τα δεδομένα αναλύθηκαν με one way ANOVA, ακολουθούμενη από post hoc Tukey test. Σε περιπτώσεις που οι προϋποθέσεις για την ANOVA δεν πληρούνταν, χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Kruskal–Wallis, μαζί με το post-hoc Dunn. Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο $p \leq 0,05$. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το ελεύθερο λογισμικό JASP v.0.16 (JASP Team 2021 Computer Software v.0.16).

4.2. Αποτελέσματα

4.2.1. Θρεπτικό διάλυμα

Οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Το pH ήταν σχεδόν σταθερό σε κάθε μεταχείριση σε όλη την πειραματική περίοδο, εμφανίζοντας μια ελαφρά αλλά στατιστικά σημαντική μείωση στην ομάδα του Control. Αντίθετα, η EC σχεδόν διπλασιάστηκε στην ομάδα Fe+K λόγω του θεικού λιπάσματος, καθώς η χορήγηση του σιδήρου δεν άλλαξε την EC, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα για την ομάδα Fe. Σχετικά με τα θρεπτικά συστατικά του νερού, η συμπλήρωση K και Fe αύξησε σημαντικά την συγκέντρωση των εν λόγω θρεπτικών στο νερό σε σύγκριση με την ομάδα Control. Η αξιοσημείωτη ενισχυμένη συγκέντρωση των SO_4^{2-} στην ομάδα Fe+K αποδόθηκε στη θεική μορφή του λιπάσματος του K. Ωστόσο, η παρόμοια εικόνα του Na δεν μπορεί να εξηγηθεί. Οι διάφορες μορφές N έδειξαν διαφορετικά πρότυπα, με την NH_3 και τα NO_2^- να είναι σταθερά και αμετάβλητα μεταξύ των ομάδων, ενώ τα NO_3^- εμφάνισαν αυξημένη συγκέντρωση στο Control σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες. Με βάση τις αναλυτικές μετρήσεις η διαφορά αυτή οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης νιτρικών την ημέρα 21 του πειράματος, που συμπίπτει με το χρονικό σημείο όπου άρχισε να καταγράφεται μειωμένη απόδοση του Control (όπως φαίνεται παρακάτω). Αυτή λοιπόν η αυξημένη συγκέντρωση στο διάλυμα σχετίζεται με την μειωμένη απορρόφηση νιτρικών από τα φυτά της συγκεκριμένης ομάδας. Οι συγκεντρώσεις PO_4^{3-} και Ca^{2+} ήταν παρόμοιες και σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 12. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=93$ για το pH, $n=48$ για DO και EC, $n=18$ για NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Fe, K, Ca^{2+} και Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe + K
pH	6,99 \pm 0,05 ^b	7,16 \pm 0,04 ^a	7,18 \pm 0,04 ^a
DO (mg L ⁻¹)	8,35 \pm 0,05 ^a	8,32 \pm 0,05 ^a	8,33 \pm 0,05 ^a
EC (μ S cm ⁻¹)	694,67 \pm 4,02 ^b	669,50 \pm 3,26 ^c	1319,94 \pm 39,32 ^a
NH_3 (mg L ⁻¹)	0,13 \pm 0,04 ^a	0,10 \pm 0,03 ^a	0,13 \pm 0,04 ^a
NO_2^- (mg L ⁻¹)	0,12 \pm 0,02 ^a	0,11 \pm 0,02 ^a	0,16 \pm 0,03 ^a
NO_3^- (mg L ⁻¹)	99,43 \pm 6,70 ^a	77,69 \pm 4,14 ^b	77,02 \pm 3,22 ^b
PO_4^{3-} (mg L ⁻¹)	32,36 \pm 1,88 ^a	27,98 \pm 2,41 ^a	34,88 \pm 2,20 ^a
SO_4^{2-} (mg L ⁻¹)	22,83 \pm 0,33 ^b	20,72 \pm 0,39 ^c	226,39 \pm 25,41 ^a
Fe (mg L ⁻¹)	0,05 \pm 0,01 ^b	1,22 \pm 0,16 ^a	1,22 \pm 0,16 ^a
K (mg L ⁻¹)	5,32 \pm 0,52 ^b	3,62 \pm 0,69 ^b	224,75 \pm 25,78 ^a
Ca^{2+} (mg L ⁻¹)	29,60 \pm 2,46 ^a	28,63 \pm 2,33 ^a	34,45 \pm 1,83 ^a
Na (mg L ⁻¹)	47,05 \pm 1,08 ^b	47,42 \pm 0,93 ^b	52,18 \pm 0,89 ^a

4.2.2. Ανάπτυξη ψαριών

Η ανάπτυξη της κόκκινης τιλάπιας δεν έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων. Οι υψηλές τιμές SGR και οι χαμηλές τιμές FCR (Πίνακας 13) σε όλες τις μεταχειρίσεις επιβεβαίωσαν ότι η τιλάπια παρουσίασε σημαντική ανάπτυξη ανεξάρτητα από την προσθήκη λιπασμάτων στο θεραπευτικό διάλυμα. Επιπλέον, τα ψάρια που εκτρέφονταν σε όλες τις συνθήκες εμφάνισαν υψηλά ποσοστά επιβίωσης.

Πίνακας 13. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας (Μέσοι όροι \pm SEM, n=30). Η απουσία εκθέτων υποδηλώνει μη στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe + K
Αρχικό βάρος (g)	5,64 \pm 0,28	5,77 \pm 0,28	5,68 \pm 0,28
Τελικό βάρος (g)	27,55 \pm 0,99	27,36 \pm 1,21	27,68 \pm 1,15
Αρχικό μήκος (cm)	6,98 \pm 0,12	7,02 \pm 0,11	6,98 \pm 0,13
Τελικό μήκος (cm)	11,30 \pm 0,13	11,26 \pm 0,16	11,28 \pm 0,15
Ημερήσια κατανάλωση τροφής (g day ⁻¹)	5,36 \pm 0,26	5,26 \pm 1,16	5,55 \pm 1,21
WG (g)	21,91 \pm 0,75	21,63 \pm 0,94	21,98 \pm 0,21
SGR (% day ⁻¹)	4,58 \pm 0,06	4,49 \pm 0,05	4,54 \pm 0,07
FCR	0,78 \pm 0,02	0,81 \pm 0,03	0,79 \pm 0,03
Επιβίωση (%)	100	93,33	96,67

4.2.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας σταμναγκαθιού

Τα φυτά στην ομάδα Control έδειξαν σημαντικά χαμηλότερη απόδοση σε όλες τις παραμέτρους ανάπτυξης που καταγράφηκαν στην τελική συγκομιδή σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες, οι οποίες είχαν παρόμοια αποτελέσματα (Πίνακας 14). Οι διαφορές αφορούσαν μία κατά 50% αυξημένη διάμετρο ροζέτας και βιομάζα ρίζας και κατά 4,3 και 3,7 φορές περισσότερο νωπό βάρος φύλλων στις ομάδες Fe και Fe+K, αντίστοιχα, σε σχέση με το Control. Ανάλογες αξιοσημείωτες διαφορές καταγράφηκαν ως προς τον αριθμό φύλλων, την φυλλική επιφάνεια και το ξηρό βάρος. Επιπλέον, η συμπλήρωση θρεπτικών βελτίωσε σημαντικά την παραγωγή της καλλιέργειας του σταμναγκαθιού (σε g m⁻²), η οποία εμφάνισε 4,5 και 4 φορές υψηλότερες τιμές στις ομάδες Fe και Fe+K σε σύγκριση με το Control (Εικόνα 17). Η τελευταία ομάδα επένδυσε συγκριτικά περισσότερη βιομάζα στο υπόγειο τμήμα από το υπέργειο, με αποτέλεσμα υψηλότερη αναλογία υπόγειας προς υπέργεια βιομάζας. Αντίθετα, στον δείκτη LSM δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

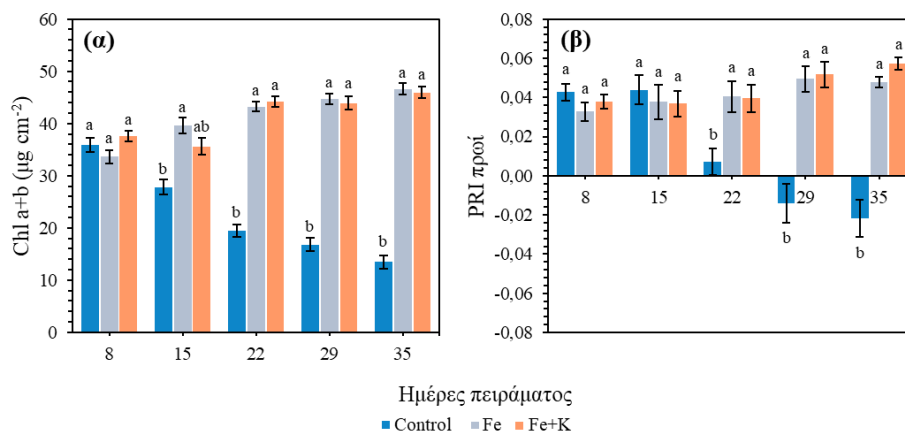
Πίνακας 14. Παράμετροι ανάπτυξης στο σταμναγκαθί στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$ για το LSM και $n=15$ για τις υπόλοιπες παραμέτρους). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

	Control	Fe	Fe+K
Νωπό βάρος υπέργειου (g)	13,83 \pm 3,30 ^b	59,42 \pm 6,56 ^a	50,61 \pm 5,77 ^a
Ξηρό βάρος υπέργειου (g)	1,33 \pm 0,23 ^b	4,89 \pm 0,50 ^a	4,25 \pm 0,40 ^a
Ξηρό βάρος υπόγειου (g)	1,82 \pm 0,45 ^b	2,77 \pm 0,33 ^a	2,77 \pm 1,01 ^a
Υπόγειο / Υπέργειο	1,41 \pm 0,20 ^a	0,59 \pm 0,05 ^b	0,68 \pm 0,06 ^b
Παραγωγή (g m ⁻²)	376,90 \pm 50,01 ^b	1683,79 \pm 168,28 ^a	1515,22 \pm 202,35 ^a
Αριθμός φύλλων	32,53 \pm 7,25 ^b	94,93 \pm 12,83 ^a	89,33 \pm 12,05 ^a
Φυλλική επιφάνεια (cm ²)	127,60 \pm 30,96 ^b	528,74 \pm 62,20 ^a	491,07 \pm 58,81 ^a
LSM (g dm ⁻²)	0,97 \pm 0,14 ^a	0,77 \pm 0,06 ^a	0,75 \pm 0,05 ^a
Διάμετρος ροζέτας (cm)	20,12 \pm 2,70 ^b	31,27 \pm 1,69 ^a	32,04 \pm 1,52 ^a



Εικόνα 17. Καλλιέργεια σταμναγκαθιού σε πλωτά ενυδρειοπονικά συστήματα. Φωτογραφίες υπέργειων και υπόγειων τμημάτων πριν την συγκομιδή των φυτών (35^η ημέρα) για τις ομάδες (α, β) ομάδα Fe+K, (γ, δ) ομάδα Fe, (ε, στ) ομάδα Control.

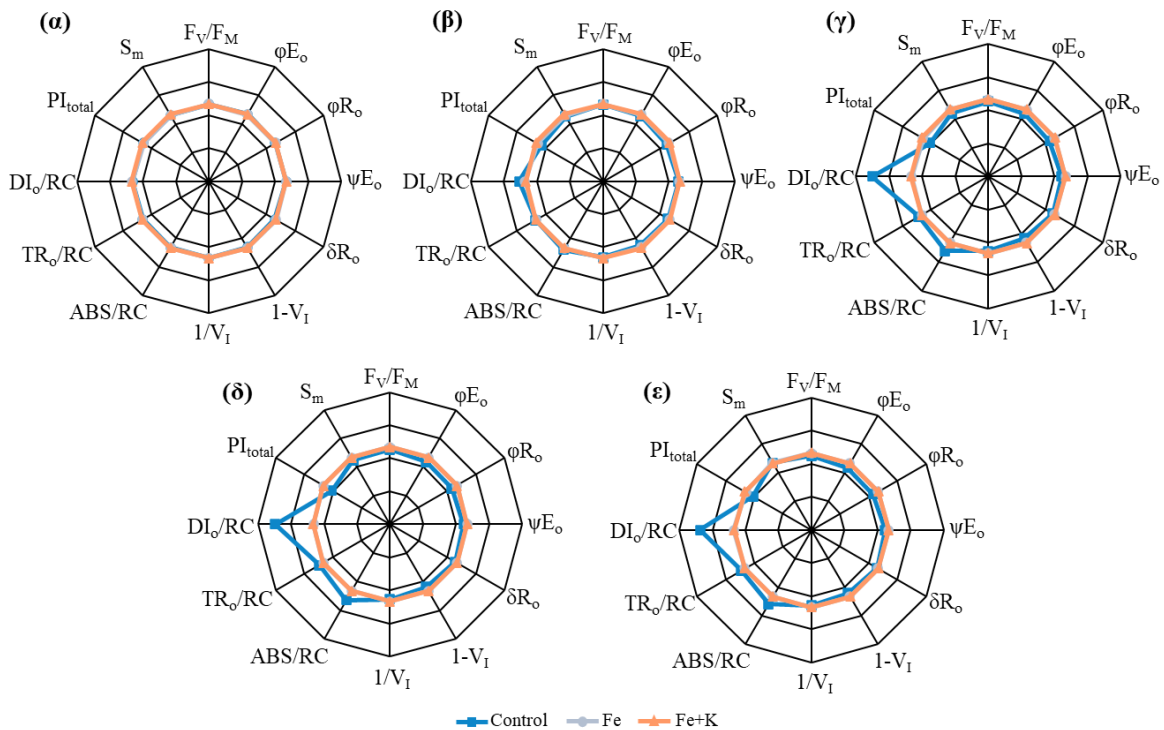
Η περιεκτικότητα των φύλλων σε ολικές χλωροφύλλες και το PRI μετρήθηκαν σε εβδομαδιαία βάση καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου (Γράφημα 13). Η συνολική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη ήταν σχεδόν σταθερή και σε υψηλά επίπεδα στις ομάδες Fe και Fe+K. Ωστόσο, τα φυτά του Control παρουσίασαν σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης ήδη από την 15^η ημέρα, η οποία επιδεινώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, φτάνοντας στο τέλος σε τιμές 70% χαμηλότερες από τις άλλες ομάδες. Αυτές οι αλλαγές στις συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών αντικατοπτρίστηκαν στο PRI. Τα φυτά του Control έδειξαν στατιστικά σημαντικές μειώσεις από την τρίτη εβδομάδα της καλλιέργειας (Ημέρα 22), φτάνοντας σε αρνητικές τιμές στις επόμενες μετρήσεις, σε αντίθεση με τις συνεχώς υψηλές τιμές που βρέθηκαν στις ομάδες Fe και Fe+K.



Γράφημα 13. (α) Ολική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη a + b και. (β) PRI (Μέσοι όροι \pm SEM, n=15). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε ημέρα πειράματος ($p \leq 0,05$).

Η παρακολούθηση των παραμέτρων φθορισμού της χλωροφύλλης α παρείχε έγκαιρη ανίχνευση της καταπόνησης στην ομάδα Control ήδη από την ημέρα 15 (Γράφημα 14). Καταγράφηκε σημαντική πτώση σε όλες τις παραμέτρους φωτοσυνθετικής απόδοσης, επιβεβαιώνοντας την αρνητική επίδραση της ανεπάρκειας θρεπτικών στην φωτοσυνθετική συσκευή. Οι ανά φωτόνιο αποδόσεις και η αποτελεσματικότητα μεταφοράς ηλεκτρονίων στους ενδιάμεσους, τελικούς αποδέκτες (ϕE_o , ϕR_o , ψE_o και δR_o αντίστοιχα), καθώς και οι αποδόσεις που σχετίζονται με το PSI και το σχετικό απόθεμα των φορέων ηλεκτρονίων ($1-V_L$, $1/V_L$), παρουσίασαν έντονα πτωτική τάση. Κατά συνέπεια, και οι δύο καθοριστικοί δείκτες απόδοσης, π.χ., PI_{abs} (που υποδηλώνει τη διατήρηση της ενέργειας που απορροφάται από την φωτοσυλλεκτική κεραία του PSII) και PI_{total} (που υποδεικνύει τη συνολική απόδοση της φωτοσύνθεσης), μειώθηκαν σημαντικά. Ωστόσο, την ημέρα 15, οι ενεργειακές ροές ανά

κέντρο αντίδρασης διατηρήθηκαν στο ίδιο επίπεδο στις ομάδες Fe και Fe+K. Αυτό όμως μεταβλήθηκε στην επόμενη μέτρηση (ημέρα 22), όπου καταγράφηκαν σημαντικές αυξήσεις στην ενέργεια θερμικής απόσβεσης (DI_o), στην συλληφθείσα (TR_o) και στην απορροφώμενη (ABS) ενέργεια ανά RC. Παρόμοια εικόνα εμφανίστηκε και στην τελική μέτρηση πριν την συγκομιδή των φυτών. Τέλος, η απουσία οποιασδήποτε διαφοροποίησης μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K σε όλο το πείραμα είναι αξιοσημείωτη.

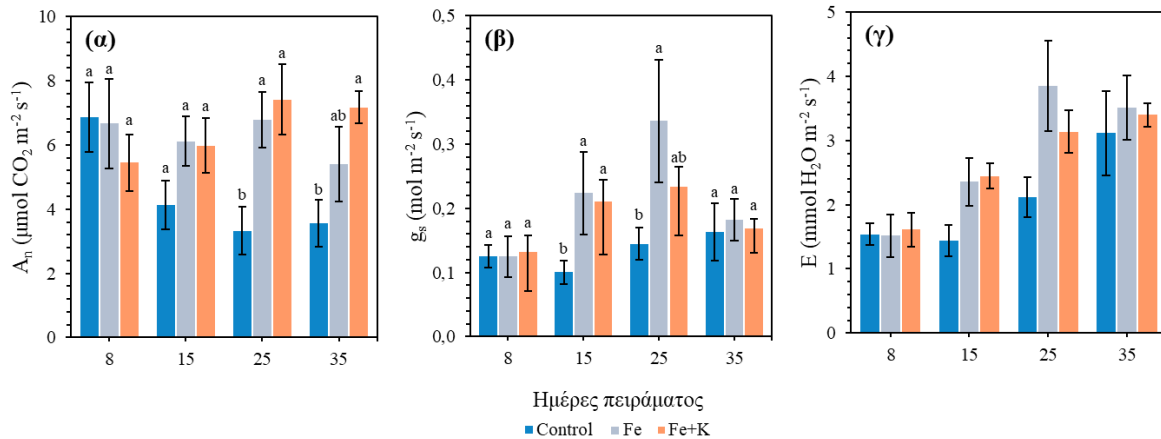


	F _v /F _M	φE _o	φR _o	ψE _o	δR _o	1-V _I	1/V _I	ABS/RC	TR _o /RC	DI _o /RC	PI _{total}	S _m
8	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
15	*	*	*	*	*	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	*	*
22	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**	**	*
29	**	**	**	**	n.s.	**	**	**	**	**	**	*
35	**	**	**	**	n.s.	**	**	**	**	**	**	n.s.

Γράφημα 14. Αραχνοδειδή γραφήματα των παραμέτρων JIP που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φθορισμού της chl a στο σταμαναγκάθι (μέσοι όροι, n=15) από εβδομαδιαίες μετρήσεις: (α) ημέρα 8, (β) ημέρα 15, (γ) ημέρα 22, (δ) ημέρα 29 και (ε) ημέρα 35. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας Fe+K. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων Fe και Fe+K, όλα τα σημεία αναφέρονται σε διαφορές μεταξύ των φυτών του Control και των άλλων δύο ομάδων (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,05$ ενώ το ** δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,001$).

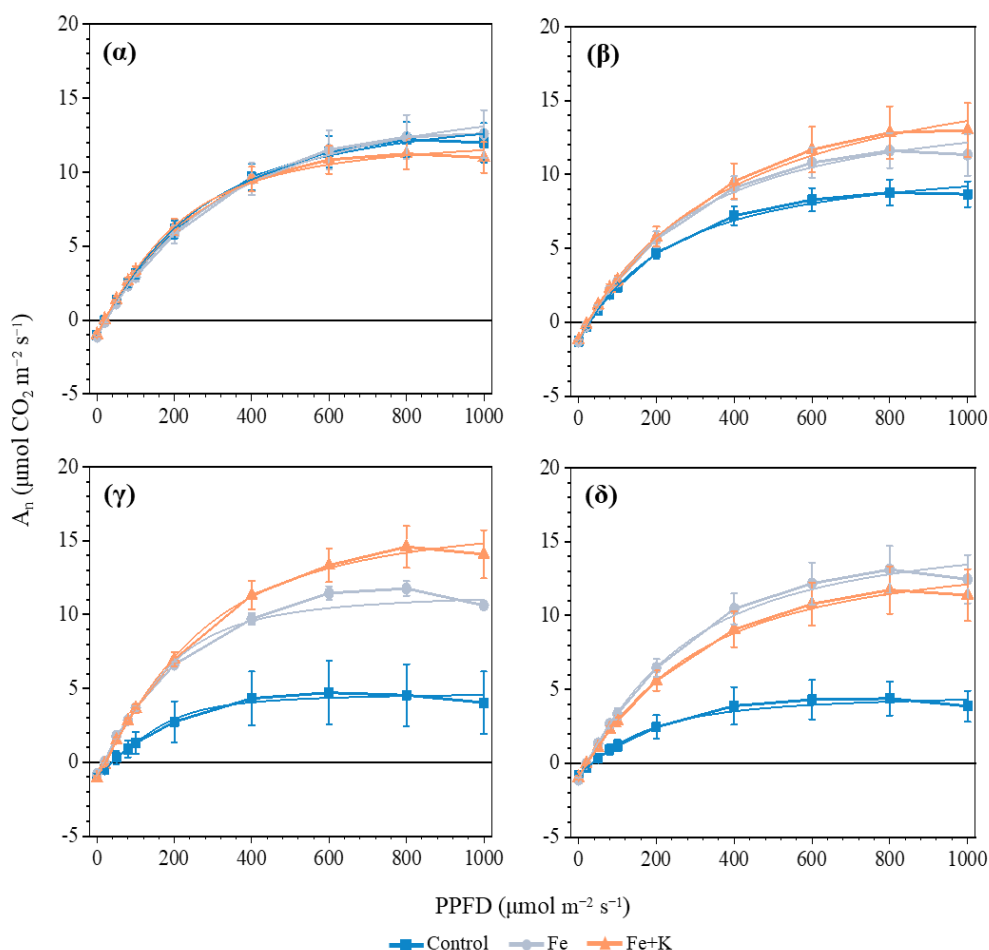
Οι πτωτικές τάσεις στην συγκέντρωση ολικών χλωροφυλλών, το PRI και την απόδοση της φωτοσυνθετικής συσκευής είχαν αρνητικές συνέπειες στον φωτοσυνθετικό ρυθμό (A_n) (Γράφημα 15), που εμφανίστηκαν όμως με μικρή χρονική καθυστέρηση. Μια μη σημαντική μείωση στο A_n του Control καταγράφηκε την ημέρα 15, η οποία όμως μεγεθύνθηκε μία

εβδομάδα μετά, με την εικόνα να παραμένει ίδια μέχρι και το τέλος του πειράματος. Η g_s κατέγραψε διαφοροποιήσεις μεταξύ των ομάδων τις πειραματικές ημέρες 15 και 25 με παρόμοιο πρότυπο όπως και στο A_n . Οι διαφορές όμως αυτές δεν αποτυπώθηκαν πριν την συγκομιδή των φυτών την ημέρα 35. Ο E δεν κατέγραψε σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Γράφημα 15. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για το σταμναγκάθι. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$). Η απουσία γραμμάτων δείχνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Η εικόνα της φωτοσυνθετικής απόδοσης συμπληρώθηκε από τις καμπύλες LCs που παρουσιάζονται στο Γράφημα 16. Το προφίλ των στιγμιαίων μετρήσεων (A_n) επιβεβαιώθηκε από τη μέγιστη φωτοσυνθετική απόδοση A_{max} . Τα πρώτα σημάδια της μειωμένης φωτοσύνθεσης στα φυτά του Control εμφανίστηκαν την ημέρα 15, σε χαμηλή ένταση φωτός ($200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) έως την μέγιστη, χωρίς όμως σημαντικές διαφορές. Σημαντική επίδραση καταγράφηκε από την ημέρα 25 και έπειτα, όπου βρέθηκε μειωμένη κατά το ήμισυ φωτοσύνθεση σε ακόμη χαμηλότερη ένταση ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και το A_{max} των φυτών του Control έφτασε σε 64% μείωση σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe + K στην τελική μέτρηση (Ημέρα 35). Επίσης, η ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) όπως και η Rd δεν επηρεάστηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Ημέρες πειράματος	A _{max}			a			Rd		
	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K	Control	Fe	Fe+K
8	14,09 ± 1,48 ^a	14,87 ± 1,90 ^a	12,82 ± 1,24 ^a	0,04 ± 0,004	0,04 ± 0,004	0,05 ± 0,003	-0,87 ± 0,11	-0,98 ± 0,12	-0,86 ± 0,10
15	10,65 ± 0,97 ^a	13,64 ± 1,69 ^a	15,53 ± 2,05 ^a	0,04 ± 0,001	0,04 ± 0,005	0,04 ± 0,003	-1,18 ± 0,04	-1,11 ± 0,12	-1,04 ± 0,10
25	5,46 ± 2,34 ^b	12,54 ± 0,39 ^{ab}	16,56 ± 2,02 ^a	0,02 ± 0,010	0,05 ± 0,005	0,05 ± 0,004	-0,90 ± 0,15	-0,72 ± 0,08	-1,00 ± 0,14
35	5,13 ± 2,00 ^b	14,58 ± 1,96 ^a	13,35 ± 2,03 ^a	0,02 ± 0,005	0,04 ± 0,004	0,04 ± 0,005	-0,73 ± 0,10	-0,91 ± 0,09	-0,85 ± 0,13

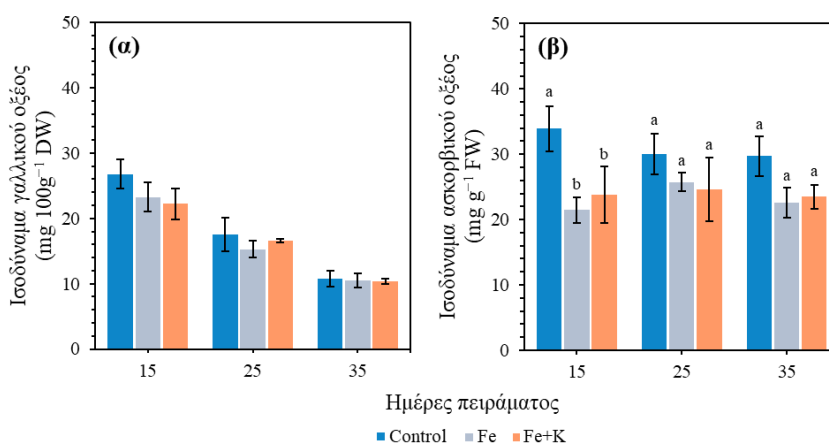
Γράφημα 16. Καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από διαφορετικές εντάσεις φωτός για το σταμναγκάθι κατά τη διάρκεια του πειράματος (Μέσοι όροι ± SEM, n=4). (α) Ημέρα 8. (β) Ημέρα 15. (γ) Ημέρα 25. (δ) Ημέρα 35. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (a) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα.

Η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών στα φύλλα του σταμναγκαθιού αναλύθηκε στην τελική συγκομιδή (Πίνακας 15). Οι συγκεντρώσεις Fe και K στους ιστούς των φύλλων ήταν αυξημένες λόγω της συμπλήρωσης θρεπτικών συστατικών στις αντίστοιχες μεταχειρίσεις και υπερερούσαν από την ομάδα Control. Η τελευταία εμφάνισε επίσης μια σημαντικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε N σε σύγκριση με την ομάδα Fe+K. Αντίθετα, στο Control συσσωρεύτηκε περισσότερο Ca, Mg και Zn σε σύγκριση με τα φυτά των μεταχειρίσεων Fe και Fe+K. Η απορρόφηση Na ήταν υψηλότερη μόνο όπου συμπληρώθηκε σίδηρος, ενώ δεν καταγράφηκαν διαφορές στις συγκεντρώσεις P, Mn και Cu.

Πίνακας 15. Θρεπτική σύσταση των φύλλων στο σταμναγκάθι στην τελική συγκομιδή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g^{-1} ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

		Control	Fe	Fe + K
%	N	2,62 \pm 0,10 ^b	3,09 \pm 0,16 ^{ab}	3,22 \pm 0,08 ^a
	P	0,43 \pm 0,02 ^a	0,76 \pm 0,07 ^a	0,76 \pm 0,02 ^a
	K	3,39 \pm 0,07 ^b	3,51 \pm 0,12 ^b	5,73 \pm 0,22 ^a
	Ca	2,43 \pm 0,20 ^a	1,67 \pm 0,04 ^{ab}	1,36 \pm 0,01 ^b
	Mg	0,60 \pm 0,03 ^a	0,42 \pm 0,03 ^b	0,29 \pm 0,01 ^c
ppm	Fe	40,11 \pm 6,83 ^b	70,34 \pm 6,97 ^a	78,78 \pm 1,77 ^a
	Zn	102,53 \pm 13,74 ^a	26,43 \pm 0,66 ^b	26,34 \pm 0,76 ^b
	Mn	63,46 \pm 18,89 ^a	39,85 \pm 11,37 ^a	41,38 \pm 4,88 ^a
	Cu	6,73 \pm 0,21 ^a	6,16 \pm 0,61 ^a	6,04 \pm 0,46 ^a
mg g^{-1}	Na	2,16 \pm 0,37 ^b	5,47 \pm 0,76 ^a	1,07 \pm 0,47 ^b

Η εικόνα της αντιοξειδωτικής ικανότητας των φύλλων στις διάφορες μεταχειρίσεις παρουσιάζεται στο Γράφημα 17. Τα φυτά της ομάδας Control ξεπέρασαν σημαντικά τις άλλες δύο ομάδες μόνο στην περίπτωση της περιεκτικότητας σε ισοδύναμα ασκορβικού οξέος την 15^η ημέρα του πειράματος. Κατά τις ημέρες 25 και 35, οι τιμές στο Control μειώθηκαν ελαφρώς, καθιστώντας τις διαφορές μεταξύ των ομάδων ασήμαντες. Στη συγκέντρωση ολικών φαινολικών δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε καμία μέτρηση.



Γράφημα 17. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων σταμναγκαθίου μετρημένη κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νεπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, n=6). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

4.3. Συζήτηση

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης κατέδειξαν ότι η ενυδραιοπονία είναι ένα αποτελεσματικό σύστημα καλλιέργειας σταμναγκαθιού, με την προϋπόθεση να συμπληρωθεί στο θρεπτικό διάλυμα σίδηρος. Οι αποδόσεις στις μεταχειρίσεις Fe και Fe+K ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές που αναφέρθηκαν για τις καλλιέργειες σταμναγκαθιού στο έδαφος (Petrooulos et al., 2018) και στην υδροπονία (Chatzigianni et al., 2019), αν και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών στο νερό που επανακυκλοφορούσε στην ενυδραιοπονία ήταν πολύ χαμηλότερες. Η απόδοση των φυτών στην ομάδα Control ήταν σημαντικά χαμηλότερη από τις τιμές που αναφέρονται στις παραπάνω έρευνες. Είναι ενδιαφέρον ότι οι υψηλότερες αποδόσεις στην ενυδραιοπονία με προσθήκες Fe και Fe+K επιτεύχθηκαν σε μικρότερη χρονική περίοδο, δηλαδή στο ένα τέταρτο του χρόνου που απαιτείται για την καλλιέργεια του είδους στο έδαφος και στο μισό χρόνο για την υδροπονία. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να σχετίζεται με διαδικασίες που δεν μελετήθηκαν στο παρόν πείραμα, όπως η μικροβιακή ποικιλότητα του θρεπτικού διαλύματος προερχόμενη από την εκτροφή των ψαριών, η οποία έχει αναφερθεί ότι αυξάνει την απόδοση των καλλιεργειών στην ενυδραιοπονία (Kasozí et al., 2021). Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αυξημένη αυτή ικανότητα για μέγιστες αποδόσεις στην ενυδραιοπονία έναντι της υδροπονίας και του εδάφους σίγουρα δεν μπορεί να αποδοθεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών στο νερό που επανακυκλοφορεί. Ενδεικτικό των διαφορών των επιπέδων των θρεπτικών συστατικών μεταξύ των καλλιεργειών είναι η συνολική συγκέντρωση αζώτου, που δεν υπερέβη τα $22,14 \text{ mg L}^{-1}$ στην ενυδραιοπονία, τιμή που είναι κατά μία τάξη μεγέθους χαμηλότερη από τα 300 mg L^{-1} που χρησιμοποίησαν οι Petrooulos et al., (2018) σε καλλιέργεια σταμναγκαθιού σε φυτοδοχεία με έδαφος. Οι σημαντικά αυξημένες δόσεις λιπασμάτων που χορήγησαν είχαν ως αποτέλεσμα απόδοση 30-44 g ανά φυτό μετά από 118 ημέρες καλλιέργειας στο έδαφος, ενώ στην παρούσα εργασία οι ομάδες Fe και Fe+K πέτυχαν 59,4 και 50,6 g ανά φυτό, αντίστοιχα, μετά από 35 ημέρες καλλιέργειας. Η υπεροχή στην απόδοση είναι πιο έντονη αν συγκρίνουμε τα προαναφερθέντα ευρήματα με αυτά των Chatzigianni et al., (2019) που πέτυχαν 28 g ανά φυτό, ως μέγιστη απόδοση μετά από 60 ημέρες υδροπονικής καλλιέργειας. Στην εργασία τους, δοκίμασαν λίπανση με δύο επίπεδα αζώτου, δηλαδή 56 και 224 mg L^{-1} , πολύ παραπάνω από τις συγκεντρώσεις αζώτου στην παρούσα μελέτη, συγκεκριμένα κατά 2,5 με 10 φορές υψηλότερα. Εντούτοις, δεν κατέγραψαν καμία σημαντική διαφορά στην ανάπτυξη του σταμναγκαθιού.

Όσον αφορά την ποιότητα του νερού της παρούσας εργασίας, καταγράφηκαν παρόμοιο pH και DO και στις τρεις μεταχειρίσεις, ενώ η προσθήκη K σε μορφή K₂SO₄ αύξησε σημαντικά την EC της αντίστοιχης ομάδας, φτάνοντας τα 1320 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Ωστόσο, αυτό το επίπεδο EC δεν θεωρείται παράγοντας καταπόνησης για το σταμναγκάθι, διότι είναι ένα είδος ανθεκτικό στην αλατότητα. Οι Petropoulos et al., (2017) δοκίμασαν διάφορα επίπεδα EC που κυμαίνονταν από το 1800 έως 8000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ και ανέφεραν ότι το σταμναγκάθι ευδοκιμεί κάτω από υψηλή EC, εμφανίζοντας καλύτερη ανάπτυξη στα 6000 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η προσθήκη Fe ήταν κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της ανάπτυξης και τη βέλτιστη λειτουργία του σταμναγκαθιού. Η ομάδα Fe εμφάνισε παρόμοια ανάπτυξη σε σύγκριση με την ομάδα Fe+K, υποδεικνύοντας ότι η προσθήκη K δεν ευνόησε ιδιαίτερα τις παραμέτρους ανάπτυξης που μελετήθηκαν. Η συγκέντρωση Fe στο θρεπτικό διάλυμα (1,22 mg L⁻¹) ήταν ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με τα 0,84 mg L⁻¹ των Chatzigianni et al., (2019). Όλα τα παραπάνω ευρήματα και η σύγκριση της ενυδρειοπονίας με άλλες καλλιεργητικές τεχνικές δείχνουν ότι το σταμναγκάθι μπορεί να ευδοκιμήσει σε σχετικά υψηλά επίπεδα Fe, αλλά χαμηλά επίπεδα N και K. Αυτή η προσέγγιση των «ελάχιστων δυνατών εισροών», αν και αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον, έρχεται σε άμεση αντιπαράθεση με την κοινή αγροτική πρακτική της εντατικής λίπανσης. Αρκετά αυτοφυή είδη όταν επιχειρήθηκε η καλλιέργειά τους εμφάνισαν βέλτιστη ανάπτυξη σε συστήματα με μικρές εισροές ή παρουσίασαν περιορισμένη απόκριση στη συμβατική λίπανση, όπως στην περίπτωση του κρίταμου (*Crithmum maritimum*) (Vlahos et al., 2019), της μαντζουράνας (*Origanum microphyllum*) (Fanourakis et al., 2022) και του φλόμου *Verbascum arcturus* (Paschalidis et al., 2021), με τα τελευταία δύο να είναι τοπικά ενδημικά της Κρήτης. Στο πλαίσιο βιώσιμων μεθόδων καλλιέργειας για τα αυτοφυή φυτά, θα πρέπει να υπερισχύει ο σεβασμός του ολιγοτροφικού τους χαρακτήρα. Αυτό τουλάχιστον έως ότου τα προγράμματα βελτίωσης επιτύχουν την παροχή φυτικού υλικού μεγιστοποιημένης παραγωγικότητας, η οποία θα αυξήσει και τις απαιτήσεις για λίπανση.

Τα αδύναμα σημεία του συστήματος ενυδρειοπονίας αντικατοπτρίστηκαν στην μειωμένη απόδοση των φυτών του Control. Όλες οι παράμετροι ανάπτυξης που αξιολογήθηκαν στην τελική συγκομιδή επιβεβαίωσαν τη σημαντική κατωτερότητα αυτών των φυτών. Αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα ήταν η κατά 4,5 και 4 φορές μειωμένη απόδοση νωπής βιομάζας υπέργειου σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe + K αντίστοιχα. Ορισμένες ελλείψεις σε θρεπτικά συστατικά, συγκεκριμένα N, Fe και K όπως αποτυπώθηκε στην θρεπτική ανάλυση των φύλλων πιθανότατα επηρέασαν την ανάπτυξη της ομάδας Control. Ταυτόχρονα, στην ίδια ομάδα καταγράφηκαν αυξήσεις σε Ca και Mg, με το τελευταίο πιθανότατα να οφειλόταν στη

μειωμένη πρόσληψη N δεδομένου του ανταγωνισμού μεταξύ αυτών των τριών στοιχείων (Sonneveld & Voogt, 2009). Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις αναπτυξιακές και λειτουργικές αποκρίσεις των φυτών Control σε σχέση με τις μειωμένες συγκεντρώσεις N και Fe στους ιστούς τους αλλά όχι του K. Αυτό διότι παρόμοια χαμηλά επίπεδα K βρέθηκαν επίσης στην ομάδα Fe χωρίς να προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη και φυσιολογία του σταμναγκαθιού. Παρόμοια σύνδεση μεταξύ μειωμένης πρόσληψης N και Fe και προβληματικής ανάπτυξης καταγράφηκε και στο πείραμα με το σπανάκι που περιγράφηκε παραπάνω. Εντούτοις, το μαρούλι με παρόμοιο πειραματικό πρωτόκολλο φάνηκε να επηρεάζεται μόνο από την ανεπάρκεια Fe και K, καθώς η συγκέντρωση N στα φύλλα ήταν παρόμοια σε όλες τις μεταχειρίσεις. Και στα δύο πειράματα, τα φυτά του Control υπέστησαν σοβαρή μείωση της απόδοσης, που κυμαινόταν από διπλάσια για το μαρούλι έως πενταπλάσια για το σπανάκι σε σύγκριση με τις ομάδες με Fe και Fe+K αντίστοιχα.

Η κακή θρεπτική κατάσταση των φυτών του Control αποτυπώθηκε στη λειτουργία τους, με ορισμένες φυσιολογικές παραμέτρους να υποδεικνύουν πρώιμα σημάδια καταπόνησης. Μία σημαντική μείωση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης των φύλλων ήταν εμφανής ήδη από τη 15^η ημέρα και πιθανώς συνδέεται με τη σημαντική μείωση του δείκτη PRI, που είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της χρήσης του φωτός (Vanikiotis et al., 2021). Η απώλεια χλωροφύλλης και η μειωμένη LUE συντονισμένα συνέβαλαν σε χαμηλότερους ρυθμούς φωτοσύνθεσης σε σύγκριση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με Fe και Fe+K, όπως έδειξαν οι στιγμιαίες μετρήσεις ανταλλαγής αερίων. Οι LCs στην ομάδα Control αποκάλυψαν χαμηλότερη φωτοσυνθετική ικανότητα, μαζί με μειωμένες ανά φωτόνιο αποδόσεις της φωτοσύνθεσης. Παρόμοιο μοτίβο ακολουθήθηκε από τις παραμέτρους φθορισμού της χλωροφύλλης *a*, που είναι αρκετά ευαίσθητες ώστε να αποτυπώνουν τη ραγδαία φθίνουσα πορεία της φωτοσυνθετικής συσκευής, με τα πρώτα σημάδια να είναι εμφανή την ημέρα 15. Αυτή η πρώτη ένδειξη συνέπεσε και συσχετίστηκε με την έναρξη της απώλειας χλωροφύλλης. Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της φυσιολογικής κατάστασης και της έντασης του φθορισμού βασίζεται στην εξάρτηση του τελευταίου από την αποτελεσματικότητα άλλων διεργασιών διαχείρισης της ενέργειας, όπως η παραγωγή φωτοχημικού έργου και η θερμική απόσβεση της περίσσειας ενέργειας (Maxwell & Johnson, 2000; Murchie & Lawson, 2013). Επιπλέον, οι παράμετροι φθορισμού είναι χρήσιμοι για την ανάλυση της απόδοσης της φωτοσυνθετικής συσκευής σε ορισμένα βήματα και συμβάντα, δίνοντας έτσι πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση του PSII και μια ένδειξη της λειτουργικότητας του PSI. Στα φυτά του Control, σημαντικές μειώσεις παρατηρήθηκαν στις περισσότερες παραμέτρους, γεγονός που υποδηλώνει μια προβληματική λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής. Η

αποτελεσματικότητα της μεταφοράς ηλεκτρονίων σε όλη την αλυσίδα ροής των αποδεκτών, καθώς και οι αντίστοιχες ανά φωτόνιο αποδόσεις, μειώθηκαν σημαντικά. Σύμφωνα με τους Kalaji et al., (2018), η ανεπάρκεια θρεπτικών προκαλεί μειώσεις τόσο στην απόδοση της απορρόφησης ενέργειας από ανοιχτά κέντρα αντίδρασης του PSII, όσο και στην ανά φωτόνιο απόδοση της μεταφοράς ηλεκτρονίων μέσω του PSII. Παράμετροι που σχετίζονται με το PSI, όπως το $1/V_I$, που σχετίζεται με το απόθεμα των δραστικών κέντρων του PSI, και το $1-V_I$, το οποίο συνδέεται με το σχετικό απόθεμα των τελικών υποδοχέων e^- του PSI, παρουσίασαν επίσης έντονη πτώση στην ομάδα Control. Τα προαναφερθέντα ευρήματα καταδεικνύουν αυξανόμενους περιορισμούς στη ροή ηλεκτρονίων κατά μήκος των PSII και PSI, αποτέλεσμα που μπορεί επίσης να σχετίζεται με το μειωμένο απόθεμα των πρωτογενών αποδεκτών e^- (Q_A) του PSII (S_m). Στα προηγούμενα κεφάλαια για το μαρούλι και σπανάκι τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανεπάρκεια θρεπτικών στο Control ασκεί ειδο-ειδικές επιδράσεις στη δραστηριότητα του PSI. Για παράδειγμα, το μαρούλι παρέμεινε ανεπηρέαστο συγκριτικά με το σπανάκι, ωστόσο και τα δύο είδη υπέστησαν μείωση της λειτουργικότητας του PSII, όπως συνέβη και στο σταμναγκάθι. Προηγούμενες μελέτες απέδειξαν τη μη βέλτιστη ανάπτυξη της φωτοσυνθετικής συσκευής υπό έλλειψη θρεπτικών συστατικών με παράλληλες μειώσεις της φωτοχημείας του PSII (Kalaji et al., 2018; Roosta, 2014a; Roosta et al., 2018). Πρόσφατα, οι Samborska-Skutnik et al., (2020) ανέφεραν ότι η ανεπάρκεια Fe επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία του PSII μειώνοντας τόσο την ικανότητα απορρόφησης φωτός, όσο και την ενεργότητα της Q_A , που είναι ο πρωταρχικός δέκτης ηλεκτρονίων. Στα φυτά του Control της παρούσας εργασίας, η διατήρηση της ενέργειας που απορροφάται από την φωτοσυλλεκτική κεραία του PSII ήταν μειωμένη (PI_{abs}), ενώ και η συνολική απόδοση της φωτοσύνθεσης μειώθηκε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, η προσθήκη Fe και Fe+K ευνόησε τη φωτοχημική απόδοση, την περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη και τον δείκτη LUE των αντίστοιχων ομάδων, διατηρώντας τις παραμέτρους αυτές σε επίπεδα σταθερά και υψηλά σε όλη την πειραματική περίοδο. Το ίδιο ισχύει για τις ανταλλαγές αερίων και τις καμπύλες LCs, όπου δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων που έλαβαν λίπανση.

Οι προαναφερθείσες αρνητικές επιπτώσεις στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, το LUE, τη φωτοχημική απόδοση και τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών του Control θα μπορούσαν να ερμηνευθούν ως άμεση βλάβη της φωτοσυνθετικής συσκευής που προκλήθηκε από την ανεπάρκεια των θρεπτικών συστατικών. Επιπλέον, η μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών στην ομάδα Control θα πρέπει πιθανώς να αποδοθεί σε ανεπάρκεια Fe και όχι σε έλλειψη N. Πράγματι, τα επίπεδα N στα φύλλα σταμναγκαθιού στην ομάδα Control

ήταν μειωμένα αλλά μόνο κατά 18% σε σχέση με την ομάδα Fe, η οποία είναι μια διαφορά που θεωρείται μάλλον οριακή για να προκαλέσει σημαντικές επιδράσεις στη φυσιολογική λειτουργία. Από την άλλη, είναι γνωστό ότι στο χλωροπλάστη χρησιμοποιούνται τα μεγαλύτερα αποθέματα Fe του φυτικού ιστού. Ως εκ τούτου, η ανεπάρκεια Fe έχει επιπτώσεις σε όλες τις πτυχές της φωτοσυνθετικής λειτουργίας (Kroh & Pilon, 2020). Η ρύθμιση σε χαμηλότερα επίπεδα (down-regulation) της φωτοσύνθεσης αποτελεί την αντίθετη όψη της βλάβης. Αναφέρεται σε αλλαγές που επιτελούν τα φυτά στο επίπεδο της φωτοσυνθετικής συσκευής για να συντονίσουν τη λειτουργία της με τις επικρατούσες συνθήκες και την πιθανή καταπόνηση προκειμένου να επιτύχουν την υψηλότερη δυνατή απόδοση που επιτρέπει το συγκεκριμένο περιβάλλον (Larbi et al., 2006a). Η χαμηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση της ομάδας Control πιθανόν σχετίζεται με ένα συνδυασμό γεγονότων όπως η μείωση της απορρόφησης φωτός, της LUE και της φωτοχημείας, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρήση του αποθέματος των φωτοσυνθετικών χρωστικών, των φορέων ηλεκτρονίων και της δραστηριότητας των RCs ως απόκριση στην ανεπάρκεια σιδήρου. Παράλληλα, η μειωμένη ανάπτυξη των Control παραπέμπει σε χαμηλή δραστηριότητα των αποδεκτών φωτοσυνθετικών προϊόντων (sink strength) που με τη σειρά της λειτουργεί ως ένας μηχανισμός αρνητικής ανάδρασης που οδηγεί τη φωτοσύνθεση σε down-regulation.

Σχετικά με τα ψάρια, η ανάπτυξη και η επιβίωση της τιλάπιας δεν επηρεάστηκαν από τα συμπληρώματα Fe και K, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα και των προαναφερθέντων πειραμάτων με το μαρούλι και το σπανάκι. Η εργασία σε συστήματα ενυδρείων Stathoroulou et al., (2021) σε συγκαλλιέργεια τιλάπιας και ρόκας επιβεβαίωσε ότι ο εμπλουτισμός του θρεπτικού διαλύματος με Fe και K με τους ίδιους ρυθμούς με την παρούσα μελέτη δεν επηρέασε την ανάπτυξη των ψαριών ούτε προκάλεσε αξιοσημείωτες ιστολογικές αλλοιώσεις στα βράγχια των ψαριών, το ήπαρ και τμήμα του μεσεντέρου τους.

Τέλος, η αντιοξειδωτική ικανότητα του σταμναγκαθιού βρέθηκε να είναι σημαντικά ενισχυμένη στα φυτά Control σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K κατά τις πρώτες ημέρες του πειράματος. Ωστόσο, οι διαφορές εξομαλύνθηκαν στη συνέχεια. Παρόμοια επίπεδα αντιοξειδωτικών μεταξύ της ομάδας Control και των ομάδων με συμπληρωματικά θρεπτικά συστατικά αναφέρθηκαν προηγουμένως για το σπανάκι, παρόλο που οι επιβλαβείς επιπτώσεις της ανεπάρκειας θρεπτικών συστατικών στην ανάπτυξη και τη λειτουργία ήταν ήδη ορατές μετά τις πρώτες 10 ημέρες (Tsoumalakou et al., 2023). Οι Jin et al., (2013) τεκμηρίωσαν ότι η ήπια ανεπάρκεια Fe δεν επηρεάζει την αντιοξειδωτική ικανότητα στο σπανάκι, αν και πολλές μελέτες έχουν συνδέσει την θρεπτική καταπόνηση με τη συσσώρευση ενεργών μορφών οξυγόνου και την ενεργοποίηση των αντιοξειδωτικών μηχανισμών (Patel et al., 2022). Το

σταμναγκάθι αποκρίνεται με μια σημαντική αύξηση των αντιοξειδωτικών του στην υψηλή αλατότητα του εδάφους, όταν η EC στο επίπεδο της ρίζας κυμαίνεται από 6 έως 8 dS m⁻¹ (Petrooulos et al., 2017), ενώ παραμένει ανεπηρέαστη από τα διαφορετικά επίπεδα αζωτούχου λίπανσης (Chatzigianni et al., 2020).

Δεδομένης της εξαιρετικής απόδοσης του σταμναγκαθιού στην ενυδραιοπονία με ελάχιστες εισροές και την ανοχή του σε συνθήκες αλατότητας, οι μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να στοχεύουν στην ενυδραιοπονική καλλιέργεια με υφάλμυρο νερό. Σε αυτό το πειραματικό σύστημα μπορεί να μελετηθεί εάν μια εφαρμογή ήπιας έως μέτριας καταπόνησης αλατότητας θα μπορούσε να πυροδοτήσει τη βιοσύνθεση δευτερογενών μεταβολιτών που συμβάλλουν στην υγεία. Θα ήταν ενδιαφέρον να βρεθεί μία ισορροπία μέσω της ακριβούς διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος ώστε να ενισχυθεί η απόκριση του δευτερογενούς μεταβολισμού των φυτών, χωρίς όμως να διακυβεύεται η ανάπτυξη και απόδοση του σταμναγκαθιού ώστε να επιτυγχάνεται το εμπορεύσιμο μέγεθος του.

4.4. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη στόχευε στην αξιολόγηση της ενυδραιοπονίας ως μεθόδου καλλιέργειας σταμναγκαθιού, στον εντοπισμό των αδύναμων σημείων του συστήματος και στην πρόταση μέτρων βελτιστοποίησης. Όλα τα παραπάνω βασίστηκαν σε μια λεπτομερή διερεύνηση των λειτουργικών και αναπτυξιακών αποκρίσεων του φυτού με την προσέγγιση των «ελάχιστων δυνατών εισροών» που επικεντρωνόταν στην προσθήκη Fe και Fe+K. Η ενυδραιοπονία αποδείχθηκε ένα σύστημα καλλιέργειας με πολλά πλεονεκτήματα για το σταμναγκάθι, δεδομένων των σημαντικά υψηλότερων αποδόσεων που επιτεύχθηκαν σε συντομότερη καλλιεργητική περίοδο με προσθήκες Fe και Fe+K σε σύγκριση με την καλλιέργεια του είδους στην υδροπονία και στο έδαφος. Τα ευρήματα της εργασίας επιβεβαίωσαν την oligοτροφική συμπεριφορά του σταμναγκαθιού καθώς οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στα συστήματα ενυδραιοπονίας ήταν σημαντικά χαμηλότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται σε άλλες καλλιεργητικές μεθόδους. Τα φυτά στην μεταχείριση Control εμφάνισαν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τις ομάδες Fe και Fe+K όσον αφορά την ανάπτυξη, τη φωτοχημεία, την περιεκτικότητα σε φωτοσυνθετικές χρωστικές, την LUE και κατ' επέκταση στη φωτοσυνθετική απόδοση και ικανότητα, τα οποία όλα αποδίδονται σε ανεπάρκεια Fe. Το τελευταίο αποδείχτηκε και το πιο αδύναμο σημείο του συστήματος, με τις πρώτες ενδείξεις καταπόνησης στη λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής να είναι ήδη

εμφανείς από την 15^η ημέρα της καλλιέργειας. Αυτή η μελέτη απέδειξε, ότι η προσθήκη σιδήρου μπορεί να ευνοήσει εξαιρετικά την απόδοση του σταμναγκαθιού σε συστήματα υψηλής βιωσιμότητας και χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, όπως είναι η ενυδρειοπονία.

Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου δημοσιοποιήθηκαν στο επιστημονικό συνέδριο HELECOS 10 της Ελληνικής Οικολογικής Εταιρείας και της Ελληνικής Βοτανικής Εταιρείας: Τσουμαλάκου Ε., Μεντέ Ε. και Λεβίζου Ε. (2021) Καλλιέργεια σταμναγκαθιού σε ενυδρειοπονία: αποκρίσεις και περιορισμοί. HELECOS 10, Οκτώβριος 14-17, σ.117

Επιπλέον προέκυψε δημοσίευση σε μορφή άρθρου στο επιστημονικό περιοδικό Sustainability: Tsoumalakou, E.; Mente, E.; Vlahos, N.; Levizou, E. Cultivating the Mediterranean Wild Edible Species *Cichorium spinosum* L. in Aquaponics: Functional and Growth Responses to Minimal Nutrient Supplementation. Sustainability 2023, 15, 5572. <https://doi.org/10.3390/su15065572>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΚΤΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΟΓΙΑΛΕΥΡΟΥ ΜΕ ΤΣΟΚΝΙΑΔΑ ΣΕ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΚΗ ΕΚΤΡΟΦΗ ΚΟΚΚΙΝΗΣ ΤΙΛΑΠΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ

1. Εισαγωγή

Τα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά αποτελούν πολλά υποσχόμενες καλλιέργειες για την αγροτική παραγωγή λόγω της αυξημένης ζήτησης τους για διαφορετικούς σκοπούς μεταξύ οποίων είναι η παραγωγή συστατικών για φάρμακα, η αρωματοποιία, αλλά και η χρήση τους στη μαγειρική και ως αφεψήματα (Imelouane et al., 2011). Ο βασιλικός είναι ένα από τα κύρια αρωματικά φυτά που καλλιεργείται κυρίως για την παραγωγή αιθέριου ελαίου, με την παγκόσμια παραγωγή του τελευταίου να κυμαίνεται από 50 έως 100 τόνους ετησίως (Jakovljević et al., 2022; Lubbe & Verpoorte, 2011). Στο γένος *Ocimum* συγκαταλέγονται περισσότερα από 30 είδη βασιλικού με τα πιο διαδεδομένα να είναι οι πλατύφυλλος βασιλικός (*Ocimum basilicum*), λεμονοβασιλικός (*Ocimum citriodorum*), λεπτόφυλλος (*Ocimum minimum*), μωβ (*O. basilicum* var. *purpurescens*) και δίχρωμος (*O. basilicum* var. *thyrsoiflorum*) (Borges et al., 2016; Ferrarezi & Bailey, 2019). Ο βασιλικός χρησιμοποιείται στη φαρμακευτική βιομηχανία και στην κοσμετολογία λόγω της περιεκτικότητας του σε βιταμίνες και μέταλλα, ενώ η υψηλή περιεκτικότητά του σε αιθέρια έλαια ενδείκνυται για την παρασκευή αρωμάτων (Mishra & Chandra, 2022). Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για την επεξεργασία κρέατος, στην κονσερβοποίηση, στην παραγωγή αναψυκτικών, αλλά και ως μπαχαρικό σε αποξηραμένη μορφή (Shahrajabian et al., 2020). Παράλληλα, ο βασιλικός καλλιεργείται για την παρασκευή σάλτσας σε μορφή pesto, όπου για την παρασκευή της απαιτείται μεγάλος αριθμός φυτών και για την μείωση του κόστους πραγματοποιείται διαδοχική κοπή των φυτών κατά την καλλιεργητική περίοδο (Ciriello et al., 2021; Milenković et al., 2019).

Η καλλιέργεια του βασιλικού έχει εφαρμοστεί στο έδαφος και στην υδροπονία, αλλά καλλιεργείται τακτικά και μέσω της ενυδρείοπονίας τόσο για ερευνητικούς όσο και για εμπορικούς σκοπούς (Elhindi et al., 2016; Saha et al., 2016). Το είδος παρουσιάζει έναν σύντομο κύκλο ζωής και το εμπορεύσιμο μέγεθος να επιτυγχάνεται σε 30 – 35 ημέρες μετά την φύτευση με τα φυτά να φτάνουν σε ύψος τα 50 – 60 cm για καλλιέργεια σε φυτοδοχεία (Rhodes & Chong, 2016). Έχει αναφερθεί ότι η καλλιέργεια του βασιλικού σε πλωτά ενυδρείοπονικά συστήματα αυξάνει την τελική απόδοση συγκριτικά με αντίστοιχη υδροπονική

καλλιέργεια (Saha et al., 2016). Διάφορα είδη ψαριών εκτρέφονται παράλληλα με την καλλιέργεια βασιλικού σε υπόστρωμα, όπως το αφρικανικό γατόψαρο (*Clarias gariepinus*), η τιλάπια του Νείλου (*Oreochromis niloticus*) και ο κυπρίνος (*Cyprinus carpio*) (Knaus et al., 2018; Knaus & Palm, 2017a; Palm et al., 2014). Ανεξάρτητα από την καλλιεργητική μέθοδο που χρησιμοποιείται, κρίνεται αναγκαίο η καλλιέργεια των φυτών να πραγματοποιείται σε όσο το δυνατόν ελεγχόμενες συνθήκες τόσο περιβαλλοντικές, όσο και θρέψης, καθώς με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι καταπονήσεις, με αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση της παραγωγής και την αύξηση της κερδοφορίας. Για παράδειγμα, στην ενυδρειοπονία η προσθήκη σιδήρου σε καλλιέργεια βασιλικού είναι απαραίτητη καθώς η έλλειψη του εμφανίζει σημάδια τροφωπενίας και μπορεί να μειώσει την τελική απόδοση και ποιότητα των φυτών (Delaide et al., 2017). Παράλληλα, η μέθοδος φύτευσης επηρεάζει την απόδοση των φυτών, όπως φάνηκε σε ενυδρειοπονικό σύστημα όπου η ταυτόχρονη φύτευση 8 φυτών m^{-2} είχε ως αποτέλεσμα έως 2 $kg m^{-2}$, ενώ η διαδοχική φύτευση αντίστοιχης πυκνότητας φυτών απέδωσε 1,8 και 0,6 $kg m^{-2}$ στην ενυδρειοπονία και στο έδαφος αντίστοιχα (Rakocsy et al., 2004).

Στην ενυδρειοπονία η θρέψη των φυτών είναι συνδεδεμένη με την είσοδο της τροφής και τον μεταβολισμό των ψαριών. Συνήθως χρησιμοποιούνται εμπορικές τροφές που παρασκευάζονται για να καλύπτονται οι ανάγκες των υδρόβιων οργανισμών που εκτρέφονται (Robaina et al., 2019). Ένας μελλοντικός στόχος της ενυδρειοπονίας είναι η ένταξη θρεπτικών συστατικών στις τροφές των ψαριών που θα εξασφαλίζουν μεν τη βιωσιμότητα του συστήματος, θα προσφέρουν δε συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις συμβατικές τροφές, ενώ θα καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες τόσο των ψαριών όσο και των φυτών και θα επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της παραγωγής (Medina et al., 2016). Η εφαρμογή τέτοιων ιχθυοτροφών θα μπορούσε να μειώσει τις εισροές λιπασμάτων που συμπληρώνουν τις ανάγκες των φυτών, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και την αύξηση της κερδοφορίας κυρίως σε συστήματα μεγάλης κλίμακας.

Η τροφή των ψαριών αποτελεί το 60% του συνολικού κόστους σε ένα σύστημα RAS εντατικής εκτροφής (Barbosa et al., 2020). Τα κύρια συστατικά που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή των ιχθυοτροφών είναι τα ιχθυάλευρα και ιχθυέλαια ως πλούσια πηγή ζωικής πρωτεΐνης (Ng & Romano, 2013). Η πίεση που ασκείται από την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης για την εκτροφή ψαριών, για ιχθυοτροφές και κατ' επέκταση για τα συστατικά τους (FAO, 2014). Όμως, με δεδομένα την ταυτόχρονη παγκόσμια ενεργειακή κρίση και αύξηση των τιμών των προϊόντων υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 η τιμή για το ιχθυάλευρο θα διπλασιαστεί ενώ για το ιχθυέλαιο η αύξηση θα ξεπεράσει το 70 % (Msangi et al. 2013). Το άλευρο σόγιας χρησιμοποιείται για την

αντικατάσταση του ιχθυάλευρου, καθώς είναι πλούσια πηγή φυτικής πρωτεΐνης (48 %) και η τιμή του είναι πιο προσιτή για την παραγωγή ιχθυοτροφών (Wattanukul et al., 2021). Όμως θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποσότητα που χρησιμοποιείται διότι το άλευρο σόγιας εμπεριέχει αντι-διατροφικούς παράγοντες, συστατικά δηλαδή που παρεμβαίνουν στην απορρόφηση θρεπτικών από την τροφή, μειώνοντας την διαθεσιμότητά τους (Magbanua & Ragaza, 2022). Αντι-διατροφικοί παράγοντες που περιέχονται στην σόγια είναι οι αναστολείς της τρυψίνης και το φυτικό οξύ (Magbanua & Ragaza, 2022), καθώς και αναστολείς πρωτεασών, λεκτίνες, τανίνες, αλκαλοειδή, γλυκοσινοειδή, φυτοοιστρογόνα, σαπωνίνες και ουρεάση (Barros et al., 2002; Picoli et al., 2022). Επιπλέον, η αντικατάσταση του ιχθυάλευρου από άλευρο σόγιας δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το 50 % καθώς έχει καταγραφεί μείωση της ανοσολογικής απόκρισης, λόγω των χαμηλότερων επιπέδων δραστηριότητας των σχετικών ενζύμων (Magbanua & Ragaza, 2022). Με βάση τα παραπάνω κρίνεται απαραίτητη η χρήση οικονομικών εναλλακτικών συστατικών φυτικής προέλευσης στις ιχθυοτροφές χωρίς να διαταράσσουν την θρεπτική ισορροπία των σιτηρεσίων.

Η τσουκνίδα (*Urtica dioica*) είναι ένα αυτοφυές αρωματικό ποώδες φυτό που ανήκει στην οικογένεια Urticaceae και απαντάται σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης, της Ασίας και της Αμερικής (Mehrabi & Firouzbakhsh, 2020). Τα πλεονεκτήματα της κατανάλωσης τσουκνίδας για τον άνθρωπο είναι ότι ενισχύει το ανοσοποιητικό σύστημα έχοντας αντικαρκινικές, αντιφλεγμονώδεις, αντιοξειδωτικές, αντιιικές, αντιβακτηριακές και αντιμυκητιακές ιδιότητες (Jan et al., 2017; Zeirina et al., 2014). Παράλληλα, η τσουκνίδα είναι πλούσια πηγή σιδήρου, ασβεστίου, καλίου και έχει υψηλά επίπεδα βιταμινών, ακετυλοχολίνης, ισταμίνης, σεροτονίνης, σαλικυλικού οξέος, λεκιθίνης, καροτενοειδών, φλαβονοειδών και θυμόλης (Dhouibi et al., 2020; Loshali et al., 2019). Έχοντας ως δεδομένα τα πλεονεκτήματα της κατανάλωσης της τσουκνίδας, γίνεται μία προσπάθεια ενσωμάτωσης της στην διατροφή των ψαριών με στόχο την χρήση αυτοφυών φυτών πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά και την παράλληλη μείωση αλεύρων φυτικής προέλευσης, με αποτέλεσμα την παραγωγή βιώσιμων και χαμηλότερου κόστους ιχθυοτροφών. Μέχρι τώρα αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει την τσουκνίδα στις ιχθυοτροφές με τα αποτελέσματα να καταγράφουν την ευεργετική επίδραση σε αιματολογικές και ανοσολογικές παραμέτρους αλλά και στην καλή λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος στα είδη *belunga* (*Huso huso*), ιριδίζουσα πέστροφα (*Oncorhynchus mykiss*), *ningu* (*Labeo victorinus*) και χρυσόψαρο (*Carassius auratus*) (Awad & Austin, 2010; Awad & Awaad, 2017; Bilen et al., 2014; Binaii et al., 2014).

Στο παρόν πείραμα εφαρμόστηκε η ολική αντικατάσταση του σογιάλευρου με άλευρο τσουκνίδας (*Urtica dioica*) στην τροφή νεαρών ατόμων κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis* sp.)

με παράλληλη καλλιέργεια βασιλικού (*Ocimum basilicum*). Ο σκοπός της εργασίας ήταν να καταγράψει τις επιπτώσεις της χρήσης της τσουκνίδας στην ανάπτυξη και λειτουργία των φυτών, αλλά και στην ανάπτυξη των ψαριών, προκειμένου να εκτιμήσει την εφαρμοσιμότητα της σε ενυδρειοπονικά συστήματα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με την ιδανική τροφή του είδους, η οποία περιείχε σογιάλευρο σε ποσοστό 30 %. Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δύο κοπές στο υπέργειο τμήμα του βασιλικού και παρακολούθηθηκαν αναπτυξιακές και φυσιολογικές παράμετροι που συμπληρώθηκαν με μετρήσεις της ποσότητας και ποιότητας του παραγόμενου αιθέριου ελαίου.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οχτώ ενυδρειοπονικά συστήματα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 ενότητα 3.1. για την εκτροφή κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis sp.*) και πλατύφυλλου βασιλικού (*Ocimum basilicum*). Πραγματοποιήθηκαν δύο μεταχειρίσεις στη διατροφή των ψαριών με διαφορετικά σιτηρέσια: α) βέλτιστη τροφή του είδους – Control (ιχθυοτροφή με 30% w/w σογιάλευρο) και β) τροφή με τσουκνίδα – Nettle (τροφή ψαριών με άλευρο τσουκνίδας ως πλήρη αντικατάσταση του σογιάλεου). Κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα αποτελούσε μία επανάληψη, επομένως υπήρχαν 4 επαναλήψεις/μεταχείριση. Η καλλιέργεια διήρκεσε 60 ημέρες με ενδιάμεση (ημέρα 30) και τελική κοπή των φυτών βασιλικού. Κατά την πειραματική διαδικασία οι εργαστηριακές συνθήκες διατηρήθηκαν σταθερές με ρυθμιστή κλίματος και η θερμοκρασία του χώρου ήταν $24,48 \pm 0,11$ °C ενώ η σχετική υγρασία ήταν $54,54 \pm 0,77$ %.

2.2. Παρασκευή σιτηρεσίων και αναλύσεις

Η διατροφική σύσταση και θρεπτική ανάλυση των δύο τροφών παρουσιάζεται στον Πίνακα 16. Τα σιτηρέσια παρασκευάστηκαν με στόχο οι τροφές να είναι ισοπρωτεϊνικής, ισοενεργιακής και ισολιπιδικής σύστασης και επιλέχθηκαν με βάση τα ιδανικά επίπεδα για νεαρά άτομα τιλάπιας. Το υπέργειο μέρος τσουκνίδας (*Urtica dioica*), η οποία συλλέχθηκε από κοντινή περιοχή στο φυσικό της περιβάλλον, αεροξηράνθηκε, αλέστηκε και χρησιμοποιήθηκε ως συστατικό της τροφής στην ομάδα Nettle για την πλήρη αντικατάσταση του σογιάλεου. Τα δύο σιτηρέσια είχαν ως κοινά στοιχεία την ύπαρξη α) ιχθυάλευρου και

ιχθυέλαιου ως πλούσια πηγή λιπαρών οξέων, β) γλουτένης καλαμποκιού ως πηγή φυτικής πρωτεΐνης, γ) σογιέλαιου για την ενίσχυση της περιεκτικότητας σε λιπίδια, δ) φωσφορικού μονοασβέστιου και ε) ένα πρόμιγμα βιταμινών και ανόργανων στοιχείων. Στη δίαιτα της ομάδας Nettle εισήχθησαν λυσίνη και μεθειονίνη για την αποκατάσταση της ισορροπίας των αμινοξέων. Σε ότι αφορά την παρασκευή της τροφής, προστέθηκαν ιχθυέλαιο, σογιέλαιο και βραστό νερό για την ανάμειξη των στερεών και ομογενοποιήθηκαν σε μίξερ (Bosch Maximum MUMXL20G, Bosch, Γερμανία). Παρασκευάστηκαν σιτηρέσια διαμέτρου 1,5 mm με τη χρήση πελετομηχανής τύπου California Pellet Mill (CL-2, Imeco GmbH, Ολλανδία) τα οποία στη συνέχεια, αεροξηράθηκαν για 24 ώρες. Η τροφή των ψαριών τοποθετήθηκε σε αεροστεγείς σάκους και διατηρήθηκε στους 4 °C μέχρι την χρήση της.

Πίνακας 16. Συστατικά και θρεπτική σύσταση των σιτηρέσιων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα για την σίτιση της κόκκινης τιλάπιας.

Συστατικά (%)	Control	Nettle
Ιχθυάλευρο	27,5	27,5
Άλευρο σίτου	11,3	3,8
Γλουτένη καλαμποκιού	18,0	23,3
Σογιάλευρο	30,0	0,0
Ιχθυέλαιο	7,2	7,2
Σογιέλαιο	3,0	4,6
Αλεύρι τσουκνίδας	0,0	30,0
Βιταμίνες και ανόργανα στοιχεία	2,0	2,0
Φωσφορικό μονοασβέστιο (MCP)	1,0	1,0
Λυσίνη	0,0	0,5
Μεθειονίνη	0,0	0,1
Θρεπτική σύσταση (% ξηρού βάρους)		
Υγρασία	7,7	6,5
Πρωτεΐνη	44,2	44,1
Λίπος	13,1	15,1
Τέφρα	8,6	13,6
Ενέργεια (kJ g ⁻¹)	20,3	20,1

2.2.1. Υγρασία και ξηρή ουσία

Για τον προσδιορισμό της υγρασίας, δείγματα τροφής (9 επαναλήψεις για κάθε σιτηρέσιο) τοποθετήθηκαν σε ζυγό ακριβείας και ζυγίστηκε 1 g τροφής για κάθε δείγμα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένα δισκάκια και τοποθετήθηκαν στους 105 °C για 24 ώρες. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήριο και μόλις έφτασαν σε θερμοκρασία δωματίου καταγράφηκε το βάρος τους. Η υγρασία και ξηρά ουσία και υπολογίστηκαν με βάση τους τύπους:

$$W_{\text{ξηρού δείγματος (g)}} = W_{\text{δείγματος \& δίσκου μετά την ξήρανση (g)}} - W_{\text{δίσκου (g)}}$$

$$\text{Ξηρά Ουσία (\%)} = (W_{\text{ξηρού δείγματος (g)}} / W_{\text{αρχικού δείγματος (g)}}) \times 100$$

$$\text{Υγρασία (\%)} = [W_{\text{αρχικού δείγματος (g)}} - W_{\text{ξηρού δείγματος (g)}}] / W_{\text{αρχικού δείγματος (g)}} \times 100$$

2.2.2. Ολικές αζωτούχες ενώσεις

Για τον προσδιορισμό των ολικών αζωτούχων ενώσεων και της πρωτεΐνης στα σιτηρέσια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kjeldahl (Cunniff, 1995). Κατά την διαδικασία, ξηρά κονιοροποιημένα δείγματα βάρους 0,2 g (τρία δείγματα/σιτηρέσιο) τοποθετήθηκαν σε γυάλινους σωλήνες πέψης και προστέθηκαν 2 ταμπλέτες καταλύτη Kjeltabs (9% CuSO₄ – 5H₂O, AppliChem GmbH, Γερμανία) και 15 mL πυκνού θειικού οξέος (H₂SO₄) για την διάσπαση των αζωτούχων ενώσεων, την απελευθέρωση του αζώτου και τελικά την δέσμευση του σε θειικό αμμώνιο. Το τυφλό δείγμα περιείχε όλα τα χημικά εκτός από δείγμα. Οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε συσκευή πέψης (Kjeltec 2000, Behr Labor-Technik, Γερμανία) για 85 min στους 150 °C. Έπειτα, τα δείγματα αφέθηκαν να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου και στην συνέχεια αποστάχθηκαν σε συσκευή απόσταξης (N 6.25, Behr Labor-Technik, Γερμανία), με προσθήκη 100 ml απιονισμένου H₂O, 80 mL καυστικού νατρίου 40% (NaOH, CENTRALCHEM, s.r.o., Σλοβακία) και 50 mL βορικού οξέος 4% (H₃BO₃, CHEM-LAB ANALYTICAL bvba, Βέλγιο). Συνολικά ο χρόνος απόσταξης κάθε δείγματος ήταν 6 min.

Στη συνέχεια, τα προκύπτοντα δείγματα βορικού αμμωνίου με προσθήκη ερυθρού του μεθυλενίου (3 σταγόνες) τιτλοδοτήθηκαν υπό συνεχή ανάδευση με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 0,1 N (HCl, AppliChem GmbH, Γερμανία) με στόχο την αλλαγή του χρώματος από κίτρινο σε έντονο φούξια, και ο όγκος του HCl καταγράφηκε.

Η περιεκτικότητα σε άζωτο και πρωτεΐνη ως % επί του ξηρού βάρους του δείγματος υπολογίστηκαν με βάση τις εξισώσεις:

$$N (\%) = ((\text{ml HCl}_{\text{δείγματος}} - \text{ml HCl}_{\text{τυφλού}}) \times 1,4008 \times N_{\text{HCl}}) / \text{Βάρος δείγματος (g)} \times 100$$

όπου N_{HCl} η κανονικότητα του HCl και ισούται με 0,1.

$$\text{Πρωτεΐνη (\%)} = ((\text{ml HCl}_{\text{δείγματος}} - \text{ml HCl}_{\text{τυφλού}}) \times 0,8754) / \text{Βάρος δείγματος (g)} \times 100$$

2.2.3. Ολικά λιπίδια

Ο προσδιορισμός των ολικών λιπιδίων πραγματοποιήθηκε με εκχύλιση Soxhlet όπου ξηρά κονιοροποιημένα δείγματα βάρους 1 g (3 δείγματα/σιτηρέσιο) τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένα γυάλινα δοχεία με χάρτινους ηθμούς (Cunniff, 1995). Στην συνέχεια στα δείγματα προστέθηκαν 150 ml πετρελαϊκού αιθέρα (CHEM-LAB ANALYTICAL bvba, Βέλγιο) και τοποθετήθηκαν σε συσκευή εκχύλισης λιπαρών ουσιών (Soxtherm Multistat/SX

PC, Sox-416 Macro, Gerhard, Γερμανία). Τα δείγματα θερμάνθηκαν στους 150 °C, στη συνέχεια υπέστησαν έκπλυση για 1,5 h και τελικά ο διαλύτης απορρίφθηκε με αποτέλεσμα την παραλαβή του λίπους στο εσωτερικό των γυάλινων δοχείων. Τυχόν υπολείμματα πετρελαϊκού αιθέρα απομακρύνθηκαν με θέρμανση των δειγμάτων στους 60 °C για 15 min, και αφού τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα για να κρυσώσουν, καταγράφηκε το βάρος τους. Το επί τοις εκατό ποσοστό ολικών λιπιδίων υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$\text{Ολικά λιπίδια (\%)} = (\text{Βάρος λίπους} / \text{Βάρος δείγματος}) \times 100$$

2.2.4. Ολική ανόργανη ουσία

Για τον προσδιορισμό της ολικής ανόργανης ουσίας (τέφρας), ξηρά κονιορτοποιημένα δείγματα βάρους 1 g (3 δείγματα/σιτηρέσιο) τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένες πορσελάνινες κάψες και έπειτα σε κλίβανο αποτέφρωσης (Nabertherm L9/12/C6, Lilienthal, Γερμανία) στους 600 °C για 3 h. Μετά τη λήξη του χρόνου τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε ξηραντήρα ώστε η θερμοκρασία τους να μειωθεί και να είναι δυνατή η μέτρηση του βάρους των δειγμάτων. Η περιεκτικότητα σε τέφρα υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$\text{Τέφρα (\%)} = (\text{Βάρος αποτεφρωμένου δείγματος} / \text{Αρχικό βάρος δείγματος}) \times 100$$

2.2.5. Ενέργεια

Για τον προσδιορισμό της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένα θερμιδόμετρο (C5000, IKA Werke, Staufen, Γερμανία). Σε κλειστό ανοξείδωτο δοχείο τύπου βόμβας τοποθετήθηκε ξηρό δείγμα βάρους 0,4 g και αφού τοποθετήθηκε στο θερμιδόμετρο έγινε καύση του δείγματος. Κατά την διαδικασία υπήρξε έκλυση θερμότητας η οποία απελευθερώθηκε από τον θάλαμο καύσης στο νερό που το περιέβαλε και αυτό με τη σειρά του μετέφερε την θερμοκρασία στο εξωτερικό δοχείο όπου υπολογίστηκε αυτόματα η ενέργεια σε Kcal g⁻¹.

2.3. Θρεπτικό διάλυμα

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού όπως θερμοκρασία, pH, DO και EC μετρούνταν σε καθημερινή βάση με τα αντίστοιχα όργανα που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 ενότητα 2.1.3. Το pH των συστημάτων διατηρήθηκε σε ουδέτερες τιμές με καθημερινές ανανεώσεις νερού (5%), ενώ η θερμοκρασία νερού διατηρήθηκε σταθερή στους 22,73 ± 0,02 °C με θερμαντικά μέσα (Ultra heater 100 W, AQUAEL, Πολωνία). Τα θρεπτικά συστατικά του νερού όπως NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, K, Ca²⁺ και Na αναλύθηκαν σε εβδομαδιαία βάση και ο Fe δύο φορές την εβδομάδα, στο σημείο εισόδου κάθε υδροπονικής καλλιέργειας

φωτομετρικά και με φλογοφωτόμετρο όπως παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα (Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.3).

2.4. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις

Για την διεξαγωγή του πειράματος 80 κόκκινες τιλάπιες μέσου αρχικού βάρους $11,97 \pm 0,36$ g και μέσου μήκους $9,23 \pm 0,09$ cm ($3,24$ kg m⁻³), διαμοιράστηκαν στα οκτώ ενυδρειοπονικά συστήματα, με τέτοια κατανομή ώστε να μην εμφανίζονται στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων. Κάθε διατροφική ομάδα περιλάμβανε 4 ενυδρειοπονικά συστήματα και κάθε σύστημα 10 κόκκινες τιλάπιες (40 ανά μεταχείριση). Η εκτροφή διήρκησε 60 ημέρες όπου τα ψάρια σιτίζονταν 6 ημέρες την εβδομάδα με δύο γεύματα στην διάρκεια της ημέρας (10:00 και 16:00) μέχρι κορεσμού με τα σιτηρέσια που παρασκευάστηκαν. Καθημερινά οι δεξαμενές των ψαριών και το φίλτρο τους καθαρίζονταν ενώ η σίτιση γινόταν με πολύ προσοχή ώστε να μην παραμένουν στα συστήματα υπολείμματα τροφής. Σε κάθε κοπή των φυτών τα ψάρια ζυγίστηκαν για την εκτίμηση της ανάπτυξης τους με τη διαδικασία και τις εξισώσεις που περιγράφηκαν μέχρι τώρα στα προηγούμενα κεφάλαια. Μετά την τελική ζύγιση των ψαριών, 12 κόκκινες τιλάπιες ανά μεταχείριση (3 ανά σύστημα), θανατώθηκαν σε διάλυμα μεθανοσουλφονικής τρικαϊνης (MS 222, 50 mg L⁻¹) με πάγο και πραγματοποιήθηκε εξαγωγή του μυϊκού ιστού ο οποίος ξηράθηκε στους 105 °C για 24 h. Στη συνέχεια μετρήθηκε το ποσοστό πρωτεϊνών και λίπους με τις αντίστοιχες μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω.

2.5. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών

Τα φυτά πλατύφυλλου βασιλικού (*Ocimum basilicum*) αγοράστηκαν από φυτώριο της περιοχής. Είχαν μέσο νωπό βάρος υπέργειου $2,20 \pm 0,24$ g και μέσο αριθμό φύλλων $7,75 \pm 0,25$. Συνολικά καλλιεργήθηκαν 40 φυτά (20 φυτά/μεταχείριση) με πυκνότητα φύτευσης 28 φυτά m⁻². Τα φυτά τοποθετήθηκαν στα οκτώ πλωτά συστήματα ενυδρειοπονίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 ενότητα 2.1.5. Η ένταση φωτός που δέχονταν τα φυτά κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν $373,55 \pm 4,19$ μmol m⁻² s⁻¹ και η φωτοπερίοδος ρυθμίστηκε στις 14 ώρες φως:10 ώρες σκοτάδι. Για την αποφυγή τροφοπενειών ασβεστίου και καλίου σε όλα τα φυτά χορηγήθηκαν διαφυλλικά σκευάσματα, συγκεκριμένα εβδομαδιαία CaO (1 ml m⁻²) (Lasting CA, ICAS International s.r.l., Ιταλία) και κάθε δέκα

ημέρες K_2O (4 ml L^{-1}) (Seisil, SEIPASA S.A., Ισπανία). Όλοι ψεκασμοί πραγματοποιήθηκαν την ημέρα μετά τις μετρήσεις ή δειγματοληψίες των φυτών. Επιπλέον, χηλικός σίδηρος Fe – DTPA 11% προστέθηκε σε όλα τα συστήματα σε συγκέντρωση 2 mg L^{-1} ως βέλτιστη συγκέντρωση σιδήρου για τον βασιλικό στην ενυδραιοπονία (Rakocy et al., 2004). Η προσθήκη του σιδήρου κρίθηκε αναγκαία από δεδομένα προ-πειράματος κατά το οποίο διαπιστώθηκε ανάπτυξη σοβαρών συμπτωμάτων τροφопενίας μετά την 2^η εβδομάδα καλλιέργειας.

2.6. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών

Ο σχεδιασμός τους πειράματος περιλάμβανε δύο κοπές του υπέργειου μέρους του βασιλικού κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου όταν τα φυτά έφταναν στο εμπορεύσιμο μέγεθος. Η 1^η κοπή πραγματοποιήθηκε στις 30 ημέρες της καλλιέργειας όπου το υπέργειο τμήμα των βασιλικών κόπηκε ακριβώς πάνω από το τρίτο ζεύγος πλάγιων κλάδων του κεντρικού βλαστού μετρούμενο από την βάση του υπέργειου τμήματος, χωρίς την αφαίρεση ριζικού συστήματος. Τα φυτά συνέχισαν να καλλιεργούνται ώσπου έπειτα από άλλες 30 ημέρες από την 1^η κοπή (ημέρα 60) πραγματοποιήθηκε και η τελική συγκομιδή τους. Και στις δύο κοπές, το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος ζυγίστηκε, ενώ στην δεύτερη κοπή μετρήθηκε και το ξηρό βάρος του υπόγειου τμήματος. Επιπρόσθετα, ο λόγος της ξηρής βιομάζας υπόγειου προς υπέργειο υπολογίστηκε μόνο στην περίπτωση της 2^{ης} κοπής όπου αφαιρέθηκε και το ριζικό τμήμα των φυτών. Η παραγωγή των φυτών όπως προέκυψε από την νωπή βιομάζα, ο αριθμός των φύλλων και η φυλλική επιφάνεια μετρήθηκαν σύμφωνα με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

2.7. Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών εκτιμήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σχεδόν σε εβδομαδιαία βάση δηλαδή τις πειραματικές ημέρες 8, 15, 22, 30, 45, 50 και 60. Για τη διαδικασία συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 12 δείγματα από ώριμα φύλλα βασιλικού ανά μεταχείριση, δηλαδή από 3 φυτά ανά σύστημα, τα οποία εκχυλίστηκαν και υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις τους όπως ήδη έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.1.).

2.8. PRI

Ο δείκτης PRI μετρήθηκε σε ώριμα φύλλα βασιλικού τις ίδιες ημέρες που αναλύθηκαν και οι φωτοσυνθετικές χρωστικές των φυτών. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με το φορητό όργανο PlantPen όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.2.), πριν το άνοιγμα του φωτισμού το πρωί.

2.9. Φθορισμός της χλωροφύλλης a *in vivo*

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης a καταγράφηκε με μετρήσεις σε προσκοτεινιασμένα φύλλα βασιλικού (για 20') με φθορισμόμετρο HandyPea ανά 15 ημέρες και συγκεκριμένα τις πειραματικές ημέρες 15, 30, 45 και 60. Αποτυπώθηκε η εικόνα των ώριμων φύλλων (1 φύλλο από κάθε φυτό) με τη χρήση των δεικτών φθορισμού της χλωροφύλλης a που αναλύθηκαν εκτεταμένα στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.3. και Πίνακας 3).

2.10. Φωτοσύνθεση

Ο φωτοσυνθετικός ρυθμός, η στοματική αγωγιμότητα και ο ρυθμός διαπνοής μελετήθηκαν σχεδόν σε εβδομαδιαία βάση, δηλαδή τις πειραματικές ημέρες 8, 15, 22, 30, 45, 50 και 60. Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε 12 ώριμα φύλλα ανά μεταχείριση (3 φυτά από κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα) με το φορητό όργανο (LI-6400 XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA) με την μέθοδο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.4) με την διαφορά ότι η μέση ένταση φωτός στο εσωτερικό του θαλάμου κατά τη διάρκεια του πειράματος ρυθμίστηκε στα $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Οι LCs μετρήθηκαν στις πειραματικές ημέρες 15, 30, 45 και 60 και το πρωτόκολλο φωτισμού των φύλλων περιλάμβανε 8 διαφορετικές εντάσεις (1000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 και $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Οι καμπύλες κατασκευάστηκαν για 8 φυτά ανά μεταχείριση.

2.11. Θρέψη φυτών

Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών στον φυτικό ιστό του βασιλικού μετρήθηκαν με ICP, εκτός από την συγκέντρωση νατρίου που μετρήθηκε με φλογοφωτόμετρο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε δύο χρονικά σημεία του πειράματος, έπειτα από κάθε κοπή. Για

τις αναλύσεις εφαρμόστηκαν τα πρωτόκολλα του Κεφαλαίου 2 (Ενότητα 2.1.7.5.) με την διαφορά ότι το νάτριο υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$\text{Απορρόφηση} = 9,7 \times \text{Συγκέντρωση Na} + 12,333 \quad R^2 = 0,9872$$

2.12. Αντιοξειδωτική ικανότητα

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών εκτιμήθηκε όπως και στα προηγούμενα πειράματα ως ικανότητα αδρανοποίησης του DPPH (εκφράστηκε ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος) και συγκέντρωση ολικών φαινολικών με τη μέθοδο Folin-Ciocalteu (ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος) (βλ. Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.7.6.). Και στις δύο περιπτώσεις μετρήθηκαν 6 δείγματα ανά μεταχείριση για τα χρονικά σημεία 15, 30, 45 και 60. Για την μέθοδο DPPH εκχυλίστηκαν 100 mg ιστού βασιλικού (που είχε διατηρηθεί στους -80 °C μετά την δειγματοληψία) σε 25 ml μεθανόλης. Πριν την ανάλυση τα δείγματα αραιώθηκαν τέσσερις φορές με μεθανόλη και στη συνέχεια αντέδρασαν με το διάλυμα DPPH 100 μM σε όγκους όπως περιγράφηκαν ήδη. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη καμπύλη:

$$A_{517\text{nm}} = -0,0008 \times \text{Ασκορβικό οξύ} + 1,3029 \quad R^2 = 0,9973$$

2.13. Αιθέρια έλαια

Η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των αιθέριων ελαίων πραγματοποιήθηκε στο τέλος του πειράματος από δείγματα ξηρού ιστού που προέκυψαν και από τις δύο κοπές μετά την ανάμειξή τους. Συνολικά για κάθε μεταχείριση εκχυλίστηκαν 3 δείγματα φύλλων. Για το καθένα, 38 g ξηρού ιστού τοποθετήθηκαν σε συσκευή διάταξης τύπου Clevenger και υδροατμοαποστάχθηκαν για 3 ώρες. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η απόδοση τους μετρώντας τον όγκο (ml) των αιθέριων ελαίων. Τα αιθέρια έλαια τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα σκούρα και αεροστεγώς κλεισμένα γυάλινα δοχεία (καπάκια και parafilm) μαζί με θειικό νάτριο για την απορρόφηση της υγρασίας και αποθηκεύτηκαν στους -20 °C. Η εκτίμηση της ποιοτικής σύστασης των αιθέριων ελαίων πραγματοποιήθηκε με αέρια χρωματογραφία – φασματομετρία μάζας (GC – MS). Τα δείγματα αραιώθηκαν με εξάνιο σε αναλογία 1:100 σε σφραγισμένα δοχεία και αναλύθηκαν με την συσκευή Thermo Trace Ultra GC με τον επιπρόσθετο εξοπλισμό ISQ MS και τον αυτόματο δειγματολήπτη TriPlus RSH (Thermo Fisher Scientific, serial number: 237688). Για την μέθοδο, 1 μl δείγματος συλλέχθηκε και αναλύθηκε με την μη πολική στήλη HP – 5ms (5%-φαινυλ)-μεθυλοπολυσιλοξάνη με χαρακτηριστικά 30 m × 0,25 mm × 0,25

µm (Agilent Technologies UK Ltd). Η θερμοκρασία της έγχυσης, της πηγής ιόντων και της διεπαφής ήταν 220, 230 και 250 °C, αντίστοιχα. Το αέριο που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία ήταν το ήλιο σε ροή 1 ml min⁻¹. Το πρόγραμμα θερμοκρασιών που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε: 70 °C για 5 min και στη συνέχεια σταδιακή αύξηση με ρυθμό 8 °C min⁻¹ φτάνοντας στους 240 °C για 15 min. Έπειτα από 5 min το εύρος μάζας καταγράφηκε στα 50 – 600 m/z, και τα φάσματα μάζας αποτυπώθηκαν με ηλεκτρονικό ιονισμό (Electron Ionization – EI). Η επεξεργασία των χρωματογραφημάτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Thermo Xcalibur Qual Browser (Thermo Fisher Scientific) όπου η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε ουσίες υπολογίστηκε από το ολοκλήρωμα των καμπυλών και την επιφάνειά τους. Τέλος, η αναγνώριση των ουσιών από τις κορυφές που επιλέχθηκαν πραγματοποιήθηκε με την χρήση της βάσης δεδομένων NIST Mass Spectral Search Program version 2.0.

2.14. Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση για όλες τις παραμέτρους που μετρήθηκαν πραγματοποιήθηκε με *t*-Test, με επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0,05$. Στις περιπτώσεις που οι προϋποθέσεις για το *t*-Test δεν πληρούνταν, χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Whitney. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό JASP v.0.16 (JASP Team 2021 Computer Software v.0.16).

3. Αποτελέσματα

3.1. Θρεπτικό διάλυμα

Οι φυσικοχημικές παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Πίνακας 17). Ενώ το DO και η EC δεν διέφεραν μεταξύ των μεταχειρίσεων, το pH στην ομάδα Nettle ήταν ελαφρώς (2%) αλλά στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερο. Το γεγονός αυτό πιθανώς να σχετίζεται με την κατά 25% χαμηλότερη συγκέντρωση NO₃⁻ στην αντίστοιχη ομάδα σε σχέση με το Control. Επίσης, οι συγκεντρώσεις των NH₃ και NO₂⁻ διέφεραν σημαντικά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων και οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν στην ομάδα Control. Εκτός από τις σχετικές με το N, όλες οι υπόλοιπες συγκεντρώσεις ιόντων ήταν παρόμοιες μεταξύ μεταχειρίσεων. Η συνολική ποσότητα χηλικού σιδήρου που εισήχθη στα συστήματα καθ' όλη την πειραματική διαδικασία ήταν 32,4 και 32,0

g για τις ομάδες Control και Nettle αντίστοιχα. Με αυτές τις προσθήκες ο σίδηρος διατηρήθηκε κοντά στα στόχο των 2 mg L⁻¹.

Πίνακας 17. Φυσιολογικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι ± SEM, n=204 για pH, DO και EC, n=36 για NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, K, Ca²⁺ και Na, n=68 για Fe). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων (p≤0,05).

	Control	Nettle
pH	7,70 ± 0,01 ^b	7,86 ± 0,01 ^a
DO (mg L ⁻¹)	7,54 ± 0,02 ^a	7,56 ± 0,02 ^a
EC (μS cm ⁻¹)	1249,83 ± 7,60 ^a	1265,09 ± 7,54 ^a
NH ₃ (mg L ⁻¹)	0,25 ± 0,02 ^a	0,21 ± 0,01 ^b
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	0,16 ± 0,02 ^a	0,08 ± 0,01 ^b
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	66,72 ± 2,31 ^a	49,70 ± 2,41 ^b
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	15,45 ± 1,74 ^a	13,26 ± 1,48 ^a
Fe (mg L ⁻¹)	1,27 ± 0,06 ^a	1,25 ± 0,07 ^a
K (mg L ⁻¹)	4,42 ± 0,32 ^a	4,90 ± 0,35 ^a
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	53,40 ± 1,58 ^a	54,93 ± 1,18 ^a
Na (mg L ⁻¹)	105,99 ± 3,55 ^a	106,14 ± 3,60 ^a

3.2. Ανάπτυξη ψαριών

Υψηλά ποσοστά επιβίωσης καταγράφηκαν για την κόκκινη τιλάπια και για τις δύο μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος (Πίνακας 18). Η αντικατάσταση του σογιάλεου με τσουκνίδα δεν επέδρασε θετικά στην ανάπτυξη της τιλάπιας, καθώς οι αναπτυξιακές παράμετροι που μελετήθηκαν είχαν σημαντικά μικρότερες τιμές σε σχέση με την βέλτιστη τροφή. Αυτό το πρότυπο καταγράφηκε και για τις δύο ημερομηνίες όπου ελήφθησαν δεδομένα, δηλαδή τις ημέρες 30 και 60 ημέρες του πειράματος. Χαρακτηριστικά στην 2^η κοπή, η ομάδα Nettle εμφάνισε μία κατά μέσο όρο 20% μείωση σε βάρος ψαριών, μήκος και SGR, αλλά υψηλότερο FCR κατά 50% συγκριτικά με την ομάδα Control. Τα ψάρια που σιτίστηκαν με την τροφή που περιείχε τσουκνίδα κατανάλωσαν κατά 12% (1^η κοπή) έως 19% (2^η κοπή) λιγότερη ποσότητα τροφής συγκριτικά με την ομάδα Control. Η παραγωγή των ψαριών ήταν μειωμένη κατά 18 έως 20 % στην ομάδα Nettle σε σχέση με την ομάδα Control κατά την 1^η και 2^η κοπή αντίστοιχα. Παρόλες όμως τις διαφορές αυτές, η ανάλυση της σάρκας των ψαριών, έδειξε ότι η αντικατάσταση του σογιάλεου με αλεύρι τσουκνίδας δεν επηρέασε αρνητικά την περιεχόμενη πρωτεΐνη και το λίπος εφόσον καταγράφηκαν παρόμοιες τιμές και στις δύο ομάδες.

Πίνακας 18. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στην 1^η και 2^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=40$ για το βάρος, μήκος, WG, SGR, FCR, επιβίωση, $n=200$ για ημερήσια κατανάλωση τροφής, $n=3$ για πρωτεΐνη, λίπος). Οι διαφορετικοί εκθέτες υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή ξεχωριστά ($p \leq 0,05$).

	1 ^η κοπή		2 ^η κοπή	
	Control	Nettle	Control	Nettle
Βάρος (g)	32,66 \pm 1,39 ^a	26,67 \pm 1,48 ^b	58,73 \pm 2,66 ^a	45,61 \pm 2,66 ^b
Μήκος (cm)	12,26 \pm 0,16 ^a	11,63 \pm 0,18 ^b	14,97 \pm 0,20 ^a	14,08 \pm 0,25 ^b
Παραγωγή (kg m ⁻³)	8,83 \pm 0,44 ^a	7,21 \pm 0,10 ^b	15,48 \pm 0,66 ^a	12,33 \pm 0,53 ^b
Ημερήσια κατανάλωση τροφής (g day ⁻¹)	6,41 \pm 0,22 ^a	5,65 \pm 0,17 ^b	9,70 \pm 0,30 ^a	7,86 \pm 0,23 ^b
WG (g)	20,67 \pm 0,97 ^a	14,72 \pm 1,00 ^b	47,11 \pm 2,42 ^a	33,67 \pm 2,29 ^b
SGR (% day ⁻¹)	3,34 \pm 0,07 ^a	2,60 \pm 0,07 ^b	2,66 \pm 0,07 ^a	2,18 \pm 0,07 ^b
FCR	0,84 \pm 0,04 ^b	1,31 \pm 0,09 ^a	0,94 \pm 0,05 ^b	1,46 \pm 0,12 ^a
Επιβίωση (%)	100 ^a	100 ^a	97,5 ^a	100 ^a
Πρωτεΐνη (%)	–	–	87,53 \pm 0,66 ^a	87,92 \pm 0,74 ^a
Λίπος (%)	–	–	3,45 \pm 0,25 ^a	2,94 \pm 0,78 ^a

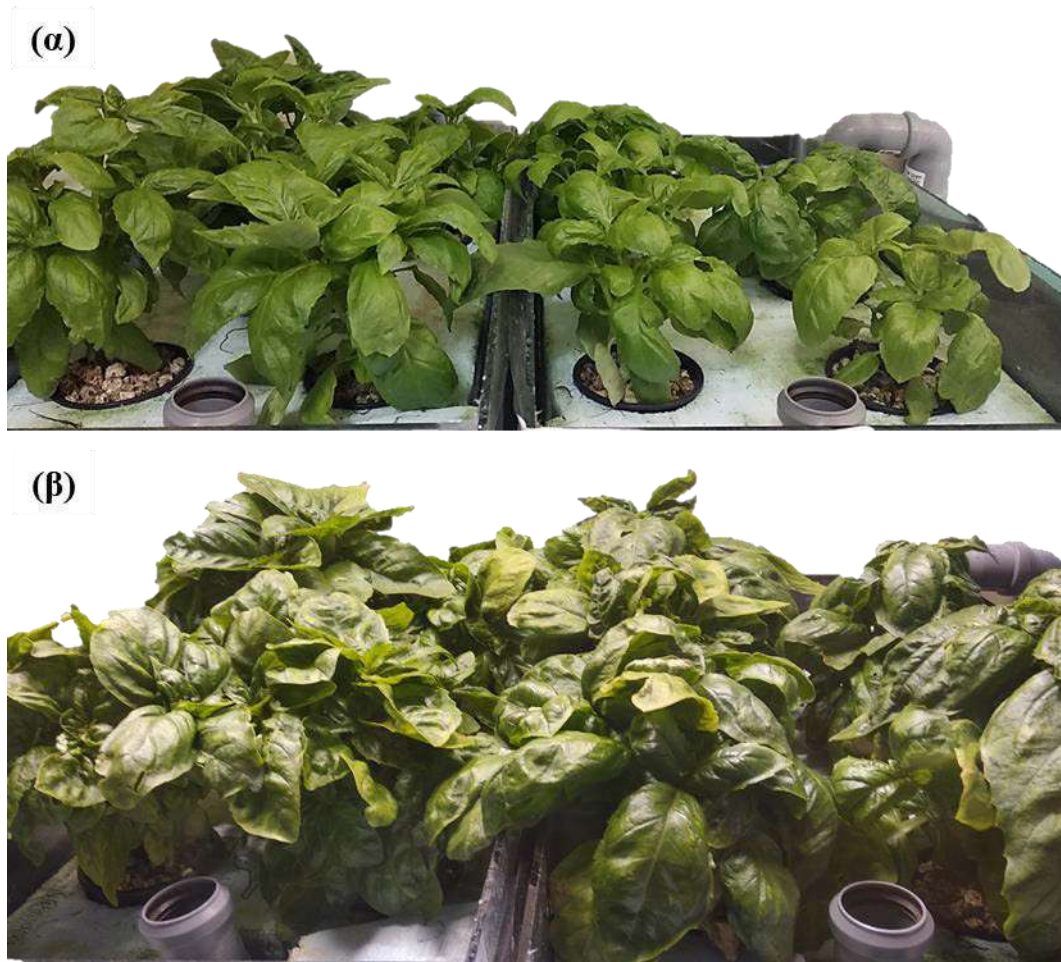
3.3. Παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας βασιλικού

Τα φυτά βασιλικού προσαρμόστηκαν επιτυχώς στα συστήματα ενυδρείοπονίας και η πρώτη κοπή του υπέργειου τμήματος των φυτών επιτεύχθηκε σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, 30 ημέρες μετά την έναρξη του πειράματος, καθώς τα φυτά έφτασαν στο εμπορεύσιμο στάδιο (Εικόνα 18). Όλες οι αναπτυξιακές παράμετροι των φυτών (νωπό και ξηρό βάρος φύλλων και υπόγειου, παραγωγή, φυλλική επιφάνεια και λόγος υπόγειου/υπέργειο) ήταν παρόμοιες μεταξύ μεταχειρίσεων, τόσο στην 1^η όσο και στην 2^η κοπή. Μοναδική εξαίρεση ήταν ο αριθμός φύλλων που ήταν σημαντικά μεγαλύτερος στην ομάδα Nettle, κατά 20% και στις δύο κοπές. Η παραγωγή που επιτεύχθηκε κατά την 1^η κοπή ήταν 1,6 και 1,8 kg m⁻² για τις ομάδες Control και Nettle, αντίστοιχα (Πίνακας 19). Κατά την τελική συγκομιδή των φυτών (ημέρα 60) η παραγωγή για τις ομάδες Control και Nettle έφτασε τα 2,1 και 2,3 kg m⁻², αντίστοιχα.

Πίνακας 19. Παράμετροι ανάπτυξης στον βασιλικό στην 1^η και 2^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=20$). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) σε κάθε κοπή.

	1 ^η κοπή		2 ^η κοπή	
	Control	Nettle	Control	Nettle
Νωπό βάρος υπέργειου (g)	57,41 \pm 3,48 ^a	66,06 \pm 4,06 ^a	75,39 \pm 5,62 ^a	83,11 \pm 5,85 ^a
Ξηρό βάρος υπέργειου (g)	2,82 \pm 0,17 ^a	2,69 \pm 0,25 ^a	4,99 \pm 0,38 ^a	5,14 \pm 0,36 ^a
Ξηρό βάρος υπόγειου (g)	–	–	2,86 \pm 0,21 ^a	3,33 \pm 0,35 ^a

Υπόγειο / Υπέργειο	–	–	0,67 ± 0,11 ^a	0,68 ± 0,08 ^a
Παραγωγή (kg m ⁻²)	1,59 ± 0,12 ^a	1,84 ± 0,05 ^a	2,09 ± 0,20 ^a	2,31 ± 0,16 ^a
Αριθμός φύλλων	78,40 ± 5,01 ^b	94,45 ± 5,83 ^a	71,75 ± 4,21 ^b	87,30 ± 4,38 ^a
Φυλλική επιφάνεια (cm ²)	1006,93 ± 60,48 ^a	1193,14 ± 88,06 ^a	870,01 ± 64,76 ^a	930,27 ± 47,50 ^a

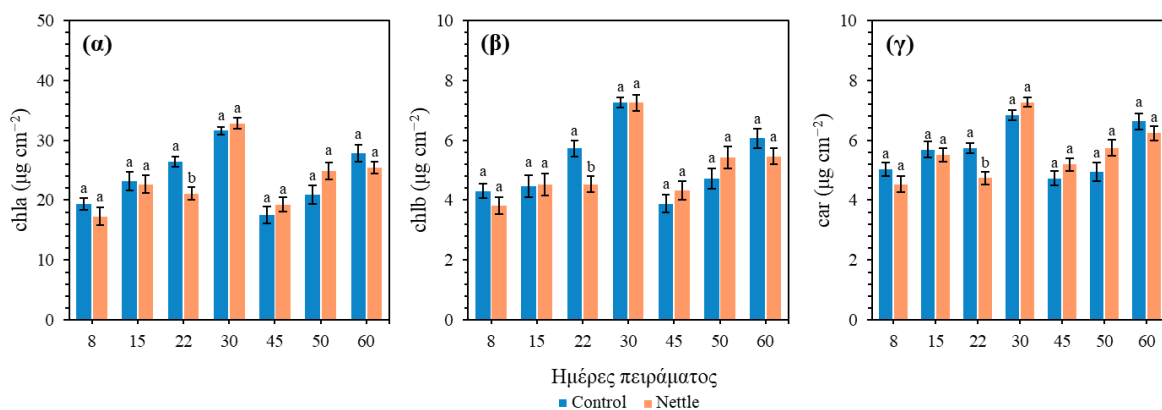


Εικόνα 18. Καλλιέργεια βασιλικού σε πλωτά συστήματα ενυδρείοπονίας (α) πριν την 1^η κοπή των φυτών και (β) πριν την 2^η κοπή των φυτών.

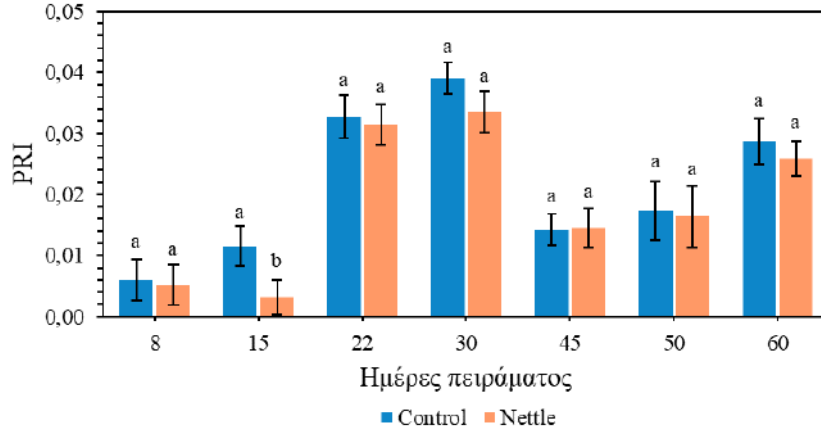
Οι συγκεντρώσεις όλων των φωτοσυνθετικών χρωστικών ήταν παρόμοιες μεταξύ των μεταχειρίσεων καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, με εξαίρεση μία σημαντική αύξηση στην περίπτωση της ομάδας Control σε σχέση με την ομάδα με προσθήκη τσουκνίδας την 22^η ημέρα του πειράματος (Γράφημα 18). Οι μεγαλύτερες τιμές για τις συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών a και b αλλά και των καροτενοειδών καταγράφηκαν μία εβδομάδα αργότερα, την ημέρα της 1^{ης} κοπής των φυτών (ημέρα 30), χωρίς την ύπαρξη σημαντικών διαφορών μεταξύ των δύο ομάδων. Για το διάστημα από την 1^η μέχρι και την 2^η κοπή των φυτών οι συγκεντρώσεις των ομάδων δεν διέφεραν μεταξύ τους για τα χρονικά σημεία που μελετήθηκαν.

Ο δείκτης PRI εμφάνισε σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων μόνο την ημέρα 15 του πειράματος (Γράφημα 19). Τις πειραματικές ημέρες 22 και 30 ο PRI κατέγραψε αυξητική τάση γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με το αναπτυξιακό στάδιο των φυτών, πρακτικώς με την πιο ώριμη φωτοσυνθετική συσκευή. Μετά την 1^η κοπή, οι τιμές μειώθηκαν ξανά και πριν την τελική συγκομιδή έφτασαν σε υψηλές τιμές και κοντά σε αυτές τις 1^{ης} κοπής. Καθ' όλη την πειραματική διαδικασία οι τιμές που καταγράφηκαν στον δείκτη PRI ήταν θετικές.

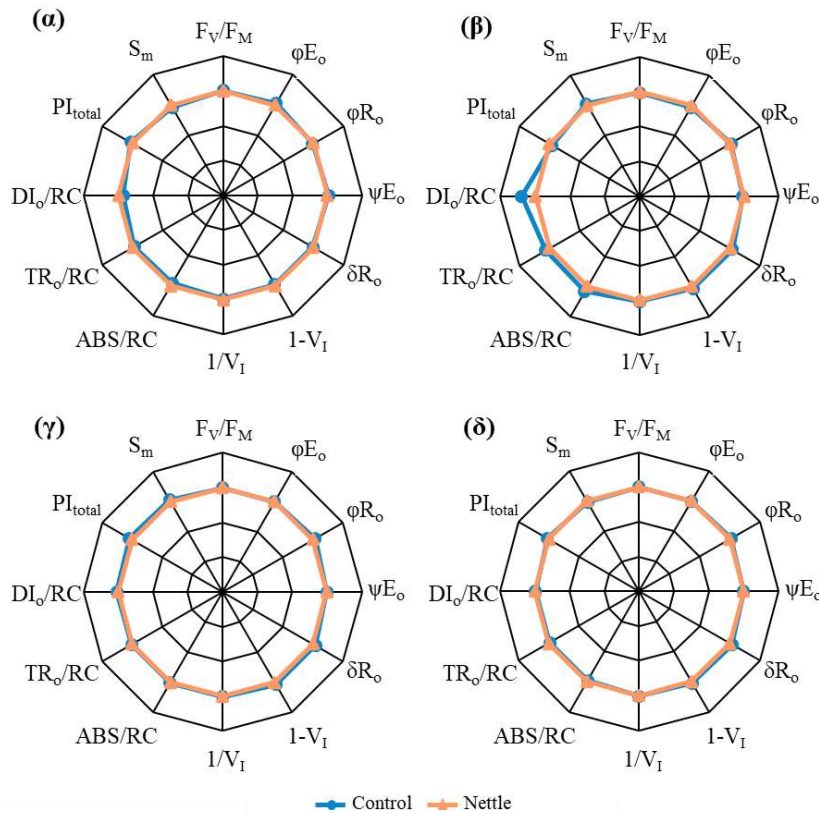
Οι περισσότερες παράμετροι του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo* που αναλύθηκαν ήταν σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος (Γράφημα 20). Την ημέρα 15 του πειράματος καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές ως προς την μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση (F_v/F_m) αλλά και στις ενεργειακές ροές ανά κέντρο αντίδρασης. Συγκεκριμένα, στην ομάδα Control καταγράφηκαν σημαντικά υψηλότερες τιμές στην απορροφώμενη (ABS), συλληφθείσα (TR_o) και στην ενέργεια θερμικής απόσβεσης (DI_o) ανά RC συγκριτικά με τα φυτά Nettle. Οι ενεργειακές ροές συνέχισαν να διαφέρουν μέχρι και την 1^η κοπή των φυτών την ημέρα 30. Μετά την κοπή (ημέρα 45) και πριν την συγκομιδή των φυτών (ημέρα 60) όλοι οι δείκτες παρέμειναν σταθεροί και δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων.



Γράφημα 18. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών στον βασιλικό κατά τη διάρκεια του πειράματος (α) chl a, (β) chl b, (γ) car (Μέσοι όροι ± SEM, n=12). Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε ημέρα πειράματος ($p \leq 0,05$).



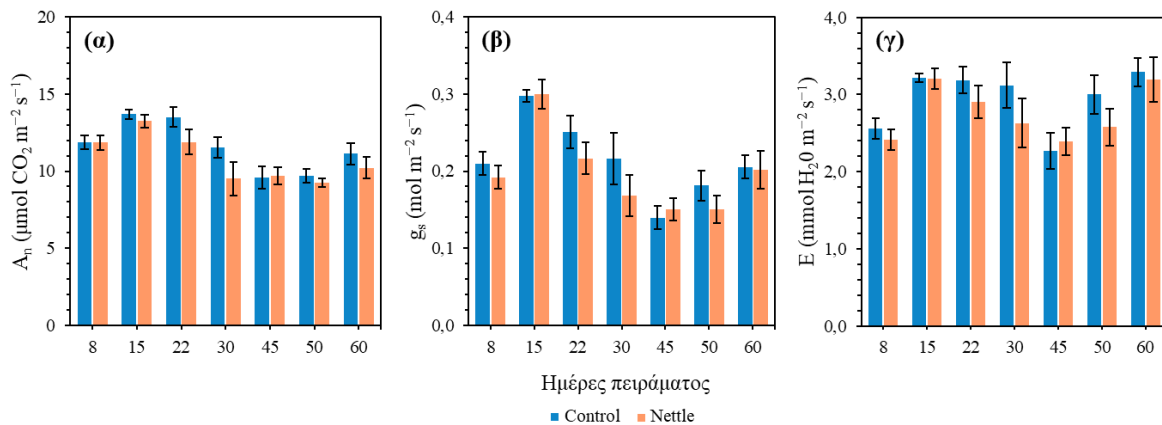
Γράφημα 19. Τιμές PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στον βασιλικό (Μέσοι όροι ± SEM, n=20). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).



		F_v/F_m	ϕE_o	ϕR_o	ψE_o	δR_o	$1-V_I$	$1/V_I$	ABS/RC	TR _o /RC	DI _o /RC	PI _{total}	S _m
Ημέρες πειράματος	15	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.
	30	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.
	45	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	60	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Γράφημα 20. Αραχνοδειδή γραφήματα των παραμέτρων JIP που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φορτισμού της chl a στον βασιλικό (μέσοι όροι, n=20) από τις μετρήσεις: (α) ημέρα 15, (β) ημέρα 30, (γ) ημέρα 45, (δ) ημέρα 60. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας Nettle. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * δείχνει διαφορές σε $p \leq 0,05$).

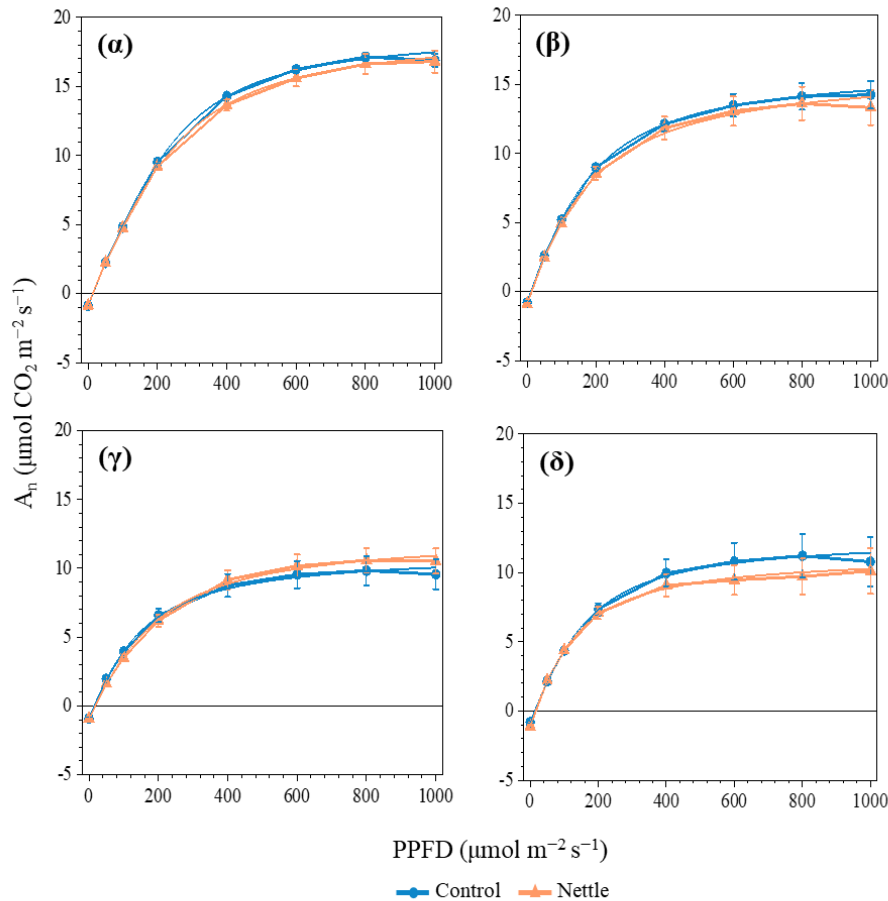
Οι εβδομαδιαίες καταγραφές των ανταλλαγών αερίων στα φύλλα του βασιλικού αποτυπώνονται στο Γράφημα 21. Κατά την διάρκεια του πειράματος δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για τον φωτοσυνθετικό ρυθμό (A_n), τη στοματική αγωγιμότητα (g_s) αλλά και τον ρυθμό διαπνοής (E). Οι τιμές του A_n ήταν σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος και σε υψηλά επίπεδα. Αντίθετα, η g_s κατέγραψε μία πτωτική τάση από την δεύτερη εβδομάδα και μετά την 1^η κοπή φτάνοντας την ημέρα 45 σε μειώσεις κατά 2,1 και 2,0 φορές για τις ομάδες Control και Nettle αντίστοιχα, σε σχέση με τις μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν την ημέρα 15. Ο ρυθμός διαπνοής παρέμεινε σταθερός κατά την πειραματική διαδικασία με τις μικρότερες τιμές να καταγράφονται κατά την 1^η και την 7^η εβδομάδα της καλλιέργειας.



Γράφημα 21. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για τον βασιλικό. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=12$). Η απουσία γραμμιάτων υποδεικνύει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).

Οι καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως εμφάνισαν όμοια εικόνα για τις δύο μεταχειρίσεις (Γράφημα 22). Οι LCs έδειξαν ότι ο φωτοσυνθετικός ρυθμός παρέμεινε σταθερός σε ένταση φωτός πάνω από τα $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ για τις δύο πρώτες μετρήσεις που αφορούν το διάστημα πριν την 1^η κοπή και αντίστοιχα σταθερός πάνω από τα $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ για τις δύο τελευταίες μετρήσεις που αφορούν το διάστημα μετά την 1^η κοπή. Η γενική εικόνα είναι ότι κατά την 1^η φάση του πειράματος (μέχρι την 1^η κοπή) η φωτοσυνθετική δραστηριότητα κινούνταν σε υψηλότερα επίπεδα από τη 2^η φάση. Σε όλες όμως τις παραπάνω περιπτώσεις δεν καταγράφηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η φωτοσυνθετική ικανότητα, όπως υποδηλώνεται από το A_{max} , δεν επηρεάστηκε από τις διαφορετικές τροφές που χορηγήθηκαν στην τιλάπια και διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα. Η ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) κυμάνθηκε σε παρόμοια επίπεδα και η μοναδική σημαντική διαφορά καταγράφηκε την ημέρα 45 του πειράματος όπου η ομάδα Nettle είχε σημαντικά χαμηλότερες

τιμές από την ομάδα Control. Η σκοτεινή, μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd) ήταν όμοια μεταξύ των μεταχειρίσεων για όλες τις ημερομηνίες και εμφάνισε μια μικρή αύξηση πριν την τελική συγκομιδή των φυτών την ημέρα 60 στην ομάδα Nettle χωρίς όμως να είναι σημαντική διαφορά.



Ημέρες πειράματος	A_{max}		a		Rd	
	Control	Nettle	Control	Nettle	Control	Nettle
15	18,72 ± 0,51	18,73 ± 0,98	0,061 ± 0,001 ^a	0,062 ± 0,001 ^a	-0,81 ± 0,04	-0,83 ± 0,07
30	15,86 ± 1,19	15,05 ± 1,37	0,071 ± 0,002 ^a	0,067 ± 0,002 ^a	-0,75 ± 0,08	-0,80 ± 0,09
45	11,07 ± 1,16	12,00 ± 1,01	0,059 ± 0,002 ^a	0,049 ± 0,004 ^b	-0,85 ± 0,06	-0,84 ± 0,04
60	12,47 ± 1,90	11,91 ± 1,73	0,060 ± 0,002 ^a	0,071 ± 0,005 ^a	-0,78 ± 0,14	-1,06 ± 0,17

Γράφημα 22. Καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως για τον βασιλικό (Μέσοι όροι ± SEM, n=8). (α) Ημέρα 15, (β) Ημέρα 30 (γ) Ημέρα 45, (δ) Ημέρα 60. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση φωτοσύνθεσης (a) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$) για κάθε ημέρα, ενώ η απουσία γραμμάτων στο A_{max} και Rd υποδεικνύει απουσία διαφορών.

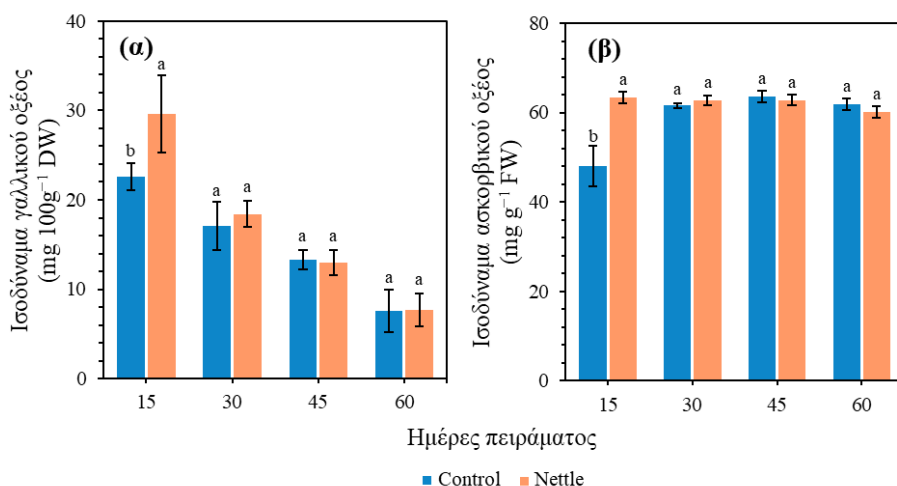
Η θρεπτική σύσταση του βασιλικού φάνηκε να επηρεάζεται από τις διαφορετικές τροφές που χορηγήθηκαν στα ψάρια σε ότι αφορά μόνο τις συγκεντρώσεις Mn, Cu και πολύ λιγότερο Mg και N (Πίνακας 20). Αντίθετα, όλα τα υπόλοιπα ανόργανα θρεπτικά εμφάνισαν παρόμοιες συγκεντρώσεις μεταξύ μεταχειρίσεων. Η αντικατάσταση του σογιάλεου με

άλευρο τσουκνίδας επηρέασε έντονα την πρόσληψη Mn καθώς ήταν διπλάσιο στην ομάδα Nettle συγκριτικά με την ομάδα Control. Τελικά, στην δεύτερη κοπή η διαφορά αυτή μειώθηκε αλλά παρέμεινε υψηλότερη συγκέντρωση Mn στην ομάδα Nettle κατά 40% συγκριτικά με την ομάδα Control. Αντίθετα, στο Control η περιεχόμενη ποσότητα Cu στην 1^η κοπή ήταν 25% μεγαλύτερη από τα φυτά Nettle, ενώ αυτή διαφορά εξαλείφθηκε στην 2^η κοπή. Σε ότι αφορά το Mg εμφάνισε μία μικρή, αλλά στατιστικώς σημαντική μείωση στην 1^η κοπή της τάξης του 10% στο Nettle, αλλά καμία διαφορά στην 2^η κοπή. Σε αυτήν, τα φυτά βασιλικού στην ομάδα Nettle είχαν 8,2% περισσότερο N συγκριτικά με το Control.

Πίνακας 20. Θρεπτική σύσταση των φύλλων βασιλικού στην 1^η και 2^η κοπή (Μέσοι όροι \pm SEM, n=3). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g⁻¹ ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm επί ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή (p \leq 0,05).

		1 ^η κοπή		2 ^η κοπή	
		Control	Nettle	Control	Nettle
%	N	3,18 \pm 0,70 ^a	3,63 \pm 0,19 ^a	3,52 \pm 0,06 ^b	3,81 \pm 0,05 ^a
	P	0,81 \pm 0,03 ^a	0,74 \pm 0,04 ^a	0,98 \pm 0,09 ^a	0,93 \pm 0,05 ^a
	K	3,91 \pm 0,30 ^a	4,17 \pm 0,13 ^a	3,99 \pm 0,27 ^a	3,98 \pm 0,14 ^a
	Ca	3,00 \pm 0,09 ^a	2,83 \pm 0,06 ^a	2,85 \pm 0,25 ^a	3,11 \pm 0,09 ^a
	Mg	0,69 \pm 0,01 ^a	0,62 \pm 0,01 ^b	0,67 \pm 0,04 ^a	0,72 \pm 0,02 ^a
	ppm	Fe	73,41 \pm 3,62 ^a	66,55 \pm 3,28 ^a	61,63 \pm 4,04 ^a
Zn		44,67 \pm 3,27 ^a	33,81 \pm 3,30 ^a	38,37 \pm 2,08 ^a	30,78 \pm 0,34 ^a
Mn		17,10 \pm 3,19 ^b	35,78 \pm 3,76 ^a	34,57 \pm 3,64 ^b	47,38 \pm 1,15 ^a
Cu		11,42 \pm 0,82 ^a	8,62 \pm 0,51 ^b	7,61 \pm 0,08 ^a	6,83 \pm 0,62 ^a
mg g ⁻¹	Na	1,47 \pm 0,25 ^a	1,33 \pm 0,15 ^a	2,71 \pm 0,43 ^a	2,87 \pm 0,46 ^a

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών μετρούμενη με διαφορετικές τεχνικές κατέγραψε διαφορετικό πρότυπο ως προς τα ολικά φαινολικά και την ικανότητα αδρανοποίησης του DPPH (Γράφημα 23). Τα ολικά φαινολικά (ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος) έδειξαν μία καθοδική πορεία κατά τη διάρκεια του χρόνου και καταγράφηκαν διαφορές μεταξύ των ομάδων μόνο την 15^η ημέρα του πειράματος, όπου η ομάδα Nettle υπερτερούσε κατά 24% σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος συγκριτικά με την μεταχείριση Control. Για τις υπόλοιπες ημερομηνίες δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Αντίθετα, η ικανότητα αδρανοποίησης του DPPH (ισοδύναμα ασκορβικού οξέος) παράμεινε περισσότερο σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος. Την 15^η ημέρα καταγράφηκε η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο ομάδων με την μεταχείριση Nettle να εμφανίζει μία κατά 30% αύξηση στη συγκέντρωση ασκορβικού οξέος συγκριτικά με την μεταχείριση Control. Έπειτα από αυτό το χρονικό σημείο οι δύο ομάδες είχαν όμοιες συγκεντρώσεις που δεν μεταβλήθηκαν ακόμη και μετά την κοπή των φυτών την ημέρα 30.



Γράφημα 23. Διακύμανση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των φύλλων κατά την πειραματική περίοδο, (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νεπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, $n=6$). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα και η απουσία γραμμάτων μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).

Η ποσότητα και ποιότητα των αιθέριων ελαίων στον βασιλικό επηρεάστηκε καθοριστικά από τα διαφορετικά σιτηρέσια που χορηγήθηκαν κατά την εκτροφή της κόκκινης τιλάπιας. Η απόδοση του αιθέριου ελαίου υπολογίστηκε σε $1,73 \pm 0,08^a$ και $1,22 \pm 0,09^b$ ml kg^{-1} ξηρού βάρους για τις ομάδες Control και Nettle αντίστοιχα, εμφανίζοντας στατιστικώς σημαντική διαφορά. Σε ότι αφορά την ποιοτική σύσταση των αιθέριων ελαίων, το γενικό πρότυπο αποτύπωσε την θετική επίδραση της τσουκνίδας ως προς το πλήθος των ουσιών που καταγράφηκαν αλλά και στην περιεκτικότητά τους. Για την ομάδα Nettle βρέθηκαν 34 ουσίες ενώ για την ομάδα Control 30 ουσίες. Γενικότερα, το 56 % των ουσιών που μελετήθηκαν διέφερε σημαντικά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Οι κύριες ουσίες που ανιχνεύτηκαν στα αιθέρια έλαια του βασιλικού ήταν οι εξής (οι τιμές αναφέρονται σε Control - Nettle αντίστοιχα): trans-Methyl cinnamate (63,75 – 38,83%), Linalool (11,88 – 19,33 %), Cadinol T (5,72 – 8,88 %), α -Bergamotene (2,93 – 5,30 %), Eucalyptol (2,01 – 3,74 %), γ -Cadinene (2,88 – 3,99 %), L-4-terpineneol (1,16- 1,27 %), α -Bulnesene (1,06 – 1,50 %) και Humulene (1,04 – 1,35 %). Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά της ουσίας trans-Methyl cinnamate που ήταν κατά 39 % λιγότερη στην περίπτωση της μεταχείρισης Nettle συγκριτικά με την ομάδα Control. Όπως αναλύθηκε και στην μεθοδολογία παραπάνω η % σύσταση των αιθέριων ελαίων υπολογίστηκε από τον αριθμό των ουσιών που ανιχνεύτηκαν και από το ολοκλήρωμα των καμπυλών. Επομένως, η υπεροχή που καταγράφηκε στην ουσία trans-Methyl cinnamate στην ομάδα Control πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι ανιχνεύτηκε μικρότερος αριθμός ουσιών (τέσσερις

λιγότερες ουσίες). Συγκεκριμένα οι ουσίες που απουσίαζαν στα αιθέρια έλαια την ομάδα Control ήταν οι Isocaryophyllene, Acoradiene, β-Eudesmol, Cycloisolongifolene, 8,9-dehydro-. Τέλος, το 70 % των ουσιών που ανιχνεύτηκαν στην ομάδα Control ήταν < 1% ενώ για την ομάδα Nettle το 56 %.

Πίνακας 21. Απόδοση και σύσταση αιθέριου ελαίου βασιλικού (% αιθέριου ελαίου) και οι χρόνοι εμφάνισης τους κατά τη χρωματογραφία με GC-MS (Μέσοι όροι ± SEM, n=3). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$) και η παύλα (-) σημαίνει απουσία της ουσίας στην αντίστοιχη ομάδα.

		Control	Nettle
Απόδοση (ml kg ⁻¹ ξηρού βάρους)		1,73 ± 0,08 ^a	1,22 ± 0,09 ^b
Χρόνος (min)	Ουσίες (%)		
6,94	d-α-Pinene	0,15 ± 0,046 ^a	0,19 ± 0,003 ^a
7,42	Camphene	0,02 ± 0,003 ^a	0,04 ± 0,012 ^a
8,12	β-phellandrene	0,05 ± 0,007 ^b	0,13 ± 0,003 ^a
8,25	L-β-Pinene	0,15 ± 0,012 ^b	0,35 ± 0,012 ^a
9,61	o-Cymene	0,16 ± 0,012 ^a	0,12 ± 0,010 ^b
9,77	Eucalyptol	2,01 ± 0,040 ^b	3,74 ± 0,255 ^a
10,52	γ-Terpinene	0,13 ± 0,033 ^a	0,14 ± 0,020 ^a
10,81	cis-Sabinenhydrate	0,22 ± 0,058 ^a	0,24 ± 0,003 ^a
11,55	Linalool	11,88 ± 1,157 ^b	19,33 ± 0,578 ^a
12,72	L-camphor	0,45 ± 0,035 ^a	0,51 ± 0,033 ^a
13,33	Camphol	0,13 ± 0,032 ^b	0,35 ± 0,023 ^a
13,54	L-4-terpineneol	1,16 ± 0,032 ^a	1,27 ± 0,087 ^a
13,93	α-Terpeneol	0,34 ± 0,038 ^b	0,73 ± 0,040 ^a
15,78	Bornyl acetate	0,13 ± 0,010 ^b	0,24 ± 0,035 ^a
17,06	a-Copaene	0,23 ± 0,028 ^b	0,58 ± 0,053 ^a
17,76	trans-Methyl cinnamate	63,75 ± 1,947 ^a	38,83 ± 1,693 ^b
18,50	Isocaryophyllene	–	0,99 ± 0,082
18,70	α-Bergamotene	2,93 ± 0,867 ^a	5,30 ± 0,428 ^a
18,75	α-Guaiene	0,64 ± 0,163 ^a	1,14 ± 0,156 ^a
19,01	β-Farnesene (E)	0,85 ± 0,107 ^b	1,55 ± 0,034 ^a
19,16	Humulene	1,04 ± 0,012 ^b	1,35 ± 0,095 ^a
19,27	Benzoic acid, 4-(1,1-dimethylethyl)-, ethenyl ester	0,18 ± 0,009 ^b	0,53 ± 0,033 ^a
19,51	Acoradiene	–	0,44 ± 0,064
19,63	Germacrene D	0,82 ± 0,256 ^a	1,42 ± 0,023 ^a
19,88	Elixene	0,46 ± 0,119 ^a	0,81 ± 0,050 ^a
19,98	α-Bulnesene	1,06 ± 0,316 ^a	1,50 ± 0,118 ^a
20,10	β-Element	0,24 ± 0,029 ^a	0,35 ± 0,033 ^a
20,18	γ-Cadinene	2,88 ± 0,292 ^b	3,99 ± 0,143 ^a
20,31	Calamenene	0,38 ± 0,026 ^b	0,63 ± 0,033 ^a
21,32	Spathulenol	0,45 ± 0,013 ^b	0,70 ± 0,007 ^a
21,96	Cubenol	0,74 ± 0,205 ^b	1,35 ± 0,053 ^a
22,39	Cadinol T	5,72 ± 1,241 ^a	8,88 ± 0,144 ^a
22,67	β-Eudesmol	–	1,02 ± 0,038
25,39	Cycloisolongifolene, 8,9-dehydro-	–	0,17 ± 0,019

4. Συζήτηση

Οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού στα ενυδρειοπονικά συστήματα διατηρήθηκαν σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά το pH στην ομάδα Nettle παρουσίασε μία μικρή αλλά στατιστικώς σημαντική αύξηση συγκριτικά με το Control. Αυτό το γεγονός μπορεί να σχετίζεται με την απορρόφηση των NO_3^- από το ριζικό σύστημα και την απελευθέρωση OH^- κατά την πρόσληψη νιτρικών, αυξάνοντας την τιμή του pH στο θρεπτικό διάλυμα (Maucieri, et al., 2019). Και στις δύο μεταχειρίσεις όμως οι τιμές του pH διατηρήθηκαν σε βέλτιστες τιμές για την ενυδρειοπονία κοντά στο 7,5, ως ένας συμβιβασμός των απαιτήσεων ψαριών, φυτών για την πρόσληψη θρεπτικών και βακτηρίων για τη νιτροποιητική διαδικασία (Goddek et al., 2015). Η διατήρηση του pH σε σταθερά επίπεδα επιτεύχθηκε με μικρές ημερήσιες αλλαγές νερού (5 %) για την αναπλήρωση απωλειών λόγω εξατμισοδιαπνοής των φυτών και της καθημερινής απομάκρυνσης των κοπράνων από τις δεξαμενές των ψαριών. Στα συστήματα εντατικής εκτροφής ψαριών μέσω των RAS η ημερήσια ανανέωση του νερού κυμαίνεται από 2 έως 10 % ενώ στην ενυδρειοπονία υπολογίζεται ότι η ημερήσια απώλεια νερού φτάνει το 2,65 % (Maucieri et al., 2017). Η συνολική περιεκτικότητα σε άζωτο στο θρεπτικό διάλυμα της ομάδας Nettle ήταν σημαντικά χαμηλότερη από την ομάδα Control. Αυτό μπορεί να σχετίζεται με χαμηλότερους ρυθμούς μεταβολισμού των ψαριών, όπως υποδεικνύει η υστέρηση στην ανάπτυξη τους σε αυτή τη μεταχείριση ή/και μεγαλύτερη απορρόφηση αζώτου από τα φυτά Nettle, όπως καταγράφηκε κατά την δεύτερη κοπή. Η ύπαρξη αμμωνίας επηρεάζει ιδιαίτερα την ανάπτυξη και επιβίωση των ψαριών και οι χαμηλές συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα είναι ένας δείκτης της επιτυχούς νιτροποιητικής διαδικασίας. Στο συγκεκριμένο πείραμα η αμμωνία διατηρήθηκε σε χαμηλές συγκεντρώσεις ($0,21 - 0,25 \text{ mg L}^{-1}$) και ήταν πολύ λιγότερη από τα επικίνδυνα όρια για την τιλάπια ($1 - 2 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_3 - \text{N}$) (Riche & Garling, 2003).

Η τσουκνίδα έχει χρησιμοποιηθεί ως συστατικό για την παρασκευή ιχθυοτροφών για την εκτροφή διάφορων ειδών. Οι Binaii et al., (2014) σε πείραμα με εκτροφή μπελούνγκας (*Huso huso*) δοκίμασαν την προσθήκη της τσουκνίδας σε ποσοστά 3, 6 και 12% σε σχέση με το Control που δεν περιλάμβανε τσουκνίδα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως υπήρξε σημαντική βελτίωση στις αιματολογικές παραμέτρους και στο ανοσοποιητικό των ιχθυδίων μετά από 4 και 8 εβδομάδες εκτροφής τους κυρίως στις ομάδες με προσθήκη τσουκνίδας σε επίπεδο 6 και 12%. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερος αριθμός ερυθρών αιμοσφαιρίων μετά από 4 εβδομάδες και σημαντικά περισσότερη αιμογλοβίνη μετά τις 8 εβδομάδες διατροφής καταγράφηκε στα ψάρια που σιτίστηκαν με το μεγαλύτερο ποσοστό τσουκνίδας σε σχέση με τις άλλες ομάδες. Επίσης,

η προσθήκη τσουκνίδας στην τροφή 6 έως 12% την 8^η εβδομάδα εκτροφής είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των λευκών αιμοσφαιρίων (Binaii et al., 2014). Η τσουκνίδα έχει χρησιμοποιηθεί και σε μικρότερο ποσοστό (1 και 2%) για την εκτροφή ιριδίζουσας πέστροφας (*Oncorhynchus mykiss*, (Düğenci et al., 2003), ενώ για το είδος *Labeo victorinus* οι προσθήκες της τσουκνίδας ήταν 1, 2 και 5 % (Awad & Austin, 2010; Ngugi et al., 2015). Τα ποσοστά από την χορήγηση της τσουκνίδας ήταν πολύ μικρότερα σε σχέση με το παρόν πείραμα που η τσουκνίδα αποτελούσε το 30 % της τροφής στην ομάδα Nettle που είχε όμως ως αποτέλεσμα μία σημαντική μείωση στην ανάπτυξη της τιλάπιας σε σύγκριση με τα ψάρια που σιτίστηκαν με την βέλτιστη εμπορική τροφή του είδους. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην μικρότερη ημερήσια κατανάλωση τροφής από τα ψάρια στην ομάδα που τράφηκαν με τσουκνίδα. Πιθανώς η μικρότερη κατανάλωση να σχετίζεται με τις διατροφικές προτιμήσεις του είδους, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι συστατικά με ελαφρώς πικρή γεύση μπορεί να απορρίπτονται ή να μην προτιμώνται από τα ψάρια στη διάρκεια της σίτισης (Zou et al., 2017). Επιπλέον, η μειωμένη πρόσληψη τροφής μπορεί να οφείλεται σε αντιδιατροφικούς παράγοντες που εμπεριέχονται σε συστατικά φυτικής προέλευσης. Μία κατηγορία είναι και οι σαπωνίνες που απαντώνται και στην τσουκνίδα και περιορίζουν την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών από το έντερο, μειώνοντας την ανάπτυξη και την πρόσληψη τροφής (Zare et al., 2023). Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται η προσθήκη λυσίνης και μεθειονίνης, ιδιαίτερα στην σίτιση της τιλάπιας με φυτικές πρωτεΐνες και μειωμένο ποσοστό ιχθυάλευρου ώστε να αυξάνεται η πρόσληψη της τροφής από τα ψάρια (Magbanua & Ragaza, 2022), κάτι που εφαρμόστηκε και στο πείραμά μας. Αν και στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν μόνο αναπτυξιακές και όχι φυσιολογικές παράμετροι της κόκκινης τιλάπιας, έχει καταγραφεί ότι η τσουκνίδα βελτιώνει την ανάπτυξη, το ανοσοποιητικό και αναπνευστικό σύστημα των ψαριών όταν συμπεριλαμβάνεται στην τροφή σε συγκεντρώσεις 2 - 5 % (Ngugi et al., 2015). Τέλος, το εκχύλισμα τσουκνίδας όταν εμπεριέχεται στην τροφή του χρυσόψαρου και της ιριδίζουσας πέστροφας σε συγκέντρωση 0,5 g kg⁻¹ βελτιώνει το ανοσοποιητικό σύστημα και αυξάνει την αντιμικροβιακή ικανότητα με την αύξηση του ενζύμου λυσοζύμης και της δραστηριότητας των φαγοκυττάρων (Bilen et al., 2016; Bilen et al., 2014).

Η αντικατάσταση του σογιάλευρου με άλλα συστατικά φυτικής προέλευσης συνηθίζεται στην εκτροφή των ψαριών. Για παράδειγμα, το σογιάλευρο έχει αντικατασταθεί από άλευρο σπόρου φοίνικα ενισχυμένο με βακτήρια (όπως *Bacillus* sp.) σε υβρίδιο κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*) βάρους 14,85 ± 0,28 g με ίδιο διατροφικό πρωτόκολλο όπως στην παρούσα εργασία (Wattanakul et al., 2021). Η έρευνα έδειξε ότι η αντικατάσταση κατά 50 % του σογιάλευρου βελτίωσε την ανάπτυξη των ψαριών, αύξησε τα

επίπεδα πεπτικών ενζύμων, όπως η πεψίνη, στο στομάχι, αλλά και τα επίπεδα πρωτεΐνης στη σάρκα των ψαριών ενώ δεν επέδρασε αρνητικά σε αιματολογικές παραμέτρους (Wattanakul et al., 2021). Αντίθετα, η ολική αντικατάσταση του σογιάλευρου μείωσε την ανάπτυξη των ψαριών, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία με την ολική αντικατάσταση του αλεύρου σόγιας με τσουκνίδα. Σε μία άλλη έρευνα των Yue & Zhou, (2008), δοκιμάστηκε αντικατάσταση του σογιάλευρου με άλευρο από σπόρους βαμβακιού σε ιχθύδια τιλάπιας ($6,27 \pm 0,12$ g) όπου η κατά 45 % αντικατάσταση μείωσε τις αιματολογικές παραμέτρους όπως τα λευκά και ερυθρά αιμοσφαίρια, η κατά 60 % αντικατάσταση σογιάλευρου δεν επηρέασε αρνητικά την ανάπτυξη των ψαριών, ενώ η ολική αντικατάσταση μείωσε σημαντικά τα επίπεδα πρωτεΐνης. Στην παρούσα εργασία δεν καταγράφηκε μείωση στην περιεκτικότητα πρωτεΐνης στην σάρκα των ψαριών από την ολική αντικατάσταση του σογιάλευρου με άλευρο τσουκνίδας. Μία πρόσφατη έρευνα των Deng et al., (2015) έδειξε ότι η αντικατάσταση του σογιάλευρου από άλευρο σπόρων καουτσούκ μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 30 % σε ιχθύδια τιλάπιας (5,2 g) χωρίς να επηρεάζει αρνητικά στην ανάπτυξη, την αντιοξειδωτική ικανότητα και το ανοσοποιητικό τους σύστημα έπειτα από έκθεση των ψαριών σε Gram- βακτήρια του είδους *Aeromonas hydrophila*. Παράλληλα, το άλευρο φάβας μπορεί να αντικαταστήσει το άλευρο σόγιας για την σίτιση νεαρών ατόμων τιλάπιας του Νείλου ($17,27 \pm 0,11$ g) σε ποσοστό 24 % χωρίς να επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη, την διαδικασία πέψης και τα επίπεδα πρωτεΐνης και λίπους στην σάρκα των ψαριών (Azaza et al., 2009).

Η τσουκνίδα έχει εφαρμοστεί και σε καλλιέργεια βασιλικού σε πείραμα με φυτοδοχεία συμπληρωματικά με οργανική λίπανση. Συγκεκριμένα σε υπόστρωμα τύρφης (70 %), ενσωματώθηκε εκχύλισμα τσουκνίδας (10 %) και κοπριά αλόγου (20 %) με αποτέλεσμα το νωπό βάρος του υπέργειου μέρους να αυξηθεί κατά 1,5 φορές συγκριτικά με τα φυτά βασιλικού που καλλιεργήθηκαν απουσία οργανικού λιπάσματος (Matlok et al., 2019). Πιο παλιές εργασίες αναφέρουν την ευεργετική χρήση της τσουκνίδας ως λίπασμα για την καλλιέργεια φυτών στο έδαφος, καθώς φάνηκε να βελτιώνει την ανάπτυξη του σιταριού, της τομάτας και του κριθαριού εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας της τσουκνίδας σε άζωτο και σίδηρο (Peterson & Jensen, 1986). Η ποικιλία κάθε είδους βασιλικού εμφανίζει άλλα αποτελέσματα ανάπτυξης, όπως για παράδειγμα στην εργασία των Ferrarezi & Bailey, (2019) όπου έδειξαν ότι οι ποικιλίες βασιλικού Genovese ($14,91 \text{ kg m}^{-2}$) και Spicy Globe ($13,99 \text{ kg m}^{-2}$) είχαν 3,6 και 3,3 φορές αντίστοιχα μεγαλύτερη απόδοση από την ποικιλία Purple Ruffles ($4,18 \text{ kg m}^{-2}$) συνολικά για τέσσερις διαδοχικές κοπές σε ενυδραιοπονική καλλιέργεια με τιλάπια. Στην παρούσα εργασία η συνολική απόδοση και για τις δύο κοπές ανά μεταχείριση κυμάνθηκε στα $3,7$ με $4,1 \text{ kg m}^{-2}$ για τις ομάδες Control και Nettle αντίστοιχα χωρίς να καταγράφονται

διαφορές μεταξύ των ομάδων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με την καλλιέργεια βασιλικού σε ενυδρειοπονία με υπόστρωμα χαλικιού και εκτροφή κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) όπου η συνολική απόδοση για τρεις διαδοχικές κοπές ήταν $3,3 \text{ kg m}^{-2}$ (Filep et al., 2016). Στην εργασία των Rakocy et al., (2004) ο βασιλικός καλλιεργήθηκε σε πλωτά ενυδρειοπονικά συστήματα με παράλληλη εκτροφή τιλάπιας και επιτεύχθηκε παραγωγή από 4 διαδοχικές κοπές όπου έφτασε συνολικά τα $7,8 \text{ kg m}^{-2}$. Παράλληλα, μία συγκριτική μελέτη στην ενυδρειοπονία έδειξε ότι το βάρος των φυτών δεν επηρεάστηκε από τους διαφορετικούς τύπους καλλιέργειας αλλά το ύψος των φυτών και η φυλλική επιφάνεια του βασιλικού αυξήθηκαν σε καλλιέργεια με υπόστρωμα χαλικιού συγκριτικά με τον βασιλικό που καλλιεργήθηκε σε πλωτά ή NFT συστήματα (Knaus et al., 2020). Συγκεκριμένα, η μέση φυλλική επιφάνεια έφτασε τα 87 cm^2 σε 40 ημέρες καλλιέργειας και ήταν 12,6 φορές χαμηλότερη από την αντίστοιχη που καταγράφηκε στην παρούσα εργασία στις 30 ημέρες καλλιέργειας. Η συνολική εικόνα της ανάπτυξης των φυτών βασιλικού υποδεικνύει ότι η προσθήκη τσουκνίδας στην ιχθυοτροφή δεν διαφοροποίησε καμία αναπτυξιακή παράμετρο σε σχέση με το Control, συμπεριλαμβανομένων νοπού και ξηρού βάρους υπέργειου και υπόγειου μέρους και φυλλικής επιφάνειας, με την εξαίρεση ότι προκάλεσε μία σημαντική αύξηση του αριθμού των φύλλων.

Οι εβδομαδιαίες μετρήσεις των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών δεν έδειξαν επίδραση της ενσωμάτωσης τσουκνίδας στην τροφή των ψαριών. Παρόμοια εικόνα καταγράφηκε στον δείκτη SPAD, ως ένδειξη της συνολικής περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, όταν η ενυδρειοπονική καλλιέργεια βασιλικού με παράλληλη εκτροφή караβίδας (*Procambarus spp.*) συγκρίθηκε με την υδροπονική (Mullis & Reyes, 2019). Αντίθετα, στην έρευνα των Yang & Kim, (2020) η καλλιέργεια βασιλικού (Genovese) στην υδροπονία είχε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές χλωροφύλλης από την ενυδρειοπονία, κάτι που παρατηρήθηκε και στην καλλιέργεια τομάτας (*Lycopersicon esculentum*, var Washington Cherry) αλλά όχι στην καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa*, var Cherokee) στο ίδιο σύστημα. Αυτή η διαφορά συσχετίστηκε με την μεγαλύτερη απορρόφηση αζώτου που επιτεύχθηκε στην περίπτωση των φυτών βασιλικού και τομάτας που καλλιεργήθηκαν στην υδροπονία (Yang & Kim, 2020). Το ίδιο πρότυπο καταγράφηκε και από τους Modarelli et al., (2023) όπου σε όμοιες συνθήκες με την παρούσα εργασία παρατήρησαν την μείωση των χλωροφυλλών κατά την δεύτερη κοπή του βασιλικού στην υδροπονία, ενώ αντίθετα στην ενυδρειοπονία οι χλωροφύλλες παρέμειναν σταθερές για τις δύο κοπές αλλά σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Να σημειωθεί εδώ ότι σε πείραμα ενσωμάτωσης τσουκνίδας με οργανικό λίπασμα σε καλλιέργειες βασιλικού βρέθηκε ότι ο δείκτης a, ως παράμετρος χρώματος που σχετίζεται με την

περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη δεν επηρεάζεται στα φύλλα βασιλικού Genovese ενώ στην ποικιλία μωβ βασιλικού (Violetto) φαίνεται να ενισχύεται (Matlok et al., 2019). Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε μία ενδιαφέρουσα διακύμανση των συγκεντρώσεων όλων των φωτοσυνθετικών χρωστικών στη διάρκεια του χρόνου. Καταγράφηκε μία αυξητική τάση από την αρχή του πειράματος μέχρι την 1^η κοπή, στη συνέχεια πτώση και πάλι σταδιακή αύξηση μέχρι την κορύφωση της 2^{ης} κοπής. Το πρότυπο αυτό παραπέμπει προφανώς σε αναπτυξιακές αλλαγές, καθώς τα νεαρότερα φύλλα με χαμηλά επίπεδα χρωστικών ανά μονάδα επιφάνειας εξελίσσονται σε ώριμα φύλλα πλήρους ανάπτυξης και υψηλών συγκεντρώσεων χρωστικών. Χαρακτηριστικό είναι ότι αμέσως πριν την 1^η κοπή οι φωτοσυνθετικές χρωστικές εμφάνισαν υψηλότερα επίπεδα σχετικά με την 2^η κοπή, ιδιαίτερα οι χλωροφύλλες a και b. Μία ελαφρώς διαφορετική εικόνα καταγράφηκε σε καροτενοειδή ενυδρειοπονικού βασιλικού, τα οποία δεν επηρεάστηκαν από τις διαφορετικές κοπές και εμφάνισαν μάλιστα σημαντικά υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με υδροπονικά καλλιεργούμενο βασιλικό (Modarelli et al., 2023). Γενικότερα οι κατά περίπτωση χαμηλές συγκεντρώσεις ανόργανων θρεπτικών στην ενυδρειοπονία αντικατοπτρίζονται σε μειωμένες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης στον πλατύφυλλο βασιλικό, όμως στην περίπτωση όπου προστίθενται κάποια λιπάσματα τα επίπεδα χλωροφυλλών έχουν όμοιες τιμές με την υδροπονία (Rodgers et al., 2022b).

Παρόμοιο πρότυπο παρουσιάστηκε και στον δείκτη PRI που σχετίζεται με τις μεταβολές στον κύκλο των ξανθοφυλλών (Sukhova & Sukhov, 2018). Όταν οι συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών και των καροτενοειδών μειώθηκαν καταγράφηκε και μείωση στις τιμές του PRI. Η κοπή του υπέργειου τμήματος των φυτών βασιλικού είχε αρνητική επίπτωση στις μετρήσεις PRI αλλά έπειτα από δύο εβδομάδες καλλιέργειας το πρότυπο αυτό ανατράπηκε και οι τιμές PRI εμφάνισαν παρόμοιες τιμές με την 1^η κοπή των φυτών. Παρόμοια εικόνα αποτυπώθηκε και στις καλλιέργειες σπανάκι και σταμναγκάθι που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου μετά την 2^η και 3^η εβδομάδα καλλιέργειας η έλλειψη θρεπτικών συστατικών και ιδιαίτερα του σιδήρου επηρέασε σημαντικά τις φωτοσυνθετικές χρωστικές και τις τιμές PRI. Αντίθετα, για την καλλιέργεια μαρουλιού καταγράφηκε αρνητική επίδραση στον δείκτη PRI λόγω της έλλειψης θρεπτικών συστατικών από την 1^η εβδομάδα αλλά μετά τα μέσα της καλλιέργειας οι όποιες διαφορές στον δείκτη ανακλαστικότητα εξισορροπήθηκαν.

Η μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της πρωτογενούς φωτοχημείας του PSII (F_v/F_m) επηρεάστηκε κατά τις πρώτες ημέρες του πειράματος αρνητικά στη μεταχείριση Nettle, αλλά στη συνέχεια φάνηκε να ανακάμπτει. Το F_v/F_m επηρεάζεται άμεσα από την επάρκεια θρεπτικών στο διάλυμα, όπως αποδείχτηκε σε συγκριτικό πείραμα καλλιέργειας βασιλικού σε ενυδρειοπονία και υδροπονία, με τις χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών της πρώτης να

μειώνουν τη παράμετρο αυτή (Roosta, 2014a). Σε μία άλλη συγκριτική μελέτη συστημάτων με διαδοχικές κοπές οι (Modarelli et al., 2023) ανέφεραν ότι το F_v/F_M στα φυτά βασιλικού δεν επηρεάστηκε από τα διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα υδροπονίας και ενυδρειοπονίας αλλά από τις κοπές, καθώς καταγράφηκαν σημαντικές μειώσεις πριν την 2^η κοπή των φυτών όλων των μεταχειρίσεων. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι μέχρι τα μέσα της καλλιεργητικής περιόδου η προσθήκη της τσουκνίδας στην τροφή της τιλάπιας αύξησε σημαντικά την απορροφημένη (ABS/RC), συλληφθείσα (TR_o/RC) και την ενέργεια θερμικής απόσβεσης (DI_o/RC) στον βασιλικό. Αντίθετες αποκρίσεις των ενεργειακών ροών καταγράφηκαν σε καλλιέργεια βασιλικού υπό αυξημένη αλατότητα (5,5 dS m⁻¹) (Shirahmadi et al., 2022), ενώ καμία επίδραση δεν βρέθηκε όταν μελετήθηκαν αυξανόμενες συγκεντρώσεις ασβεστίου στο έδαφος από 50 έως 100 mM (Solouki et al., 2023).

Η καλή κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και στις δύο μεταχειρίσεις, όπως υποδεικνύεται από το φθορισμό της χλωροφύλλης, αποτυπώθηκε και στις μετρήσεις ανταλλαγής αερίων, καθώς και στις LCs. Οι φωτοσυνθετικές παράμετροι διατηρήθηκαν σε σχετικά υψηλά και σταθερά επίπεδα, ενώ δεν διαπιστώθηκαν διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε A_n , g_s και E σε κανένα χρονικό σημείο του πειράματος. Αντιστοίχως, χωρίς διαφορές ήταν και η A_{max} και R_d , ενώ μία σημαντική υπεροχή του Control στην ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης κατά την ημέρα 45 δεν αξιολογείται ως καθοριστική. Όπως και στις υπόλοιπες παραμέτρους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, υψηλότερα επίπεδα φωτοσύνθεσης επιτεύχθηκαν κατά την 1^η φάση του πειράματος (πριν την 1^η κοπή), χωρίς ωστόσο σημαντικές διαφοροποιήσεις. Εντονότερη ήταν η διακύμανση στην g_s μεταξύ της 1^{ης} και 2^{ης} φάσης του πειράματος, χωρίς να καταγραφούν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Φαίνεται λοιπόν ότι η αναπτυξιακή φάση του φυτού επηρεάζει τις μετρηθείσες παραμέτρους χωρίς επίδραση της παρουσίας τσουκνίδας στην τροφή των ψαριών. Το ενυδρειοπονικό σύστημα φαίνεται να προάγει την φωτοσύνθεση του βασιλικού, όπως προκύπτει από την σύγκριση των δεδομένων της παρούσας εργασίας με καλλιέργεια στο έδαφος. Στην τελευταία, η βέλτιστη λίπανση για το είδος οδήγησε σε μέσες τιμές φωτοσύνθεσης 5,21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Borges et al., 2016), ενώ στην παρούσα εργασία οι υψηλότεροι φωτοσυνθετικοί ρυθμοί που καταγράφηκαν στα μέσα της καλλιέργειας στην ομάδα Control και Nettle ήταν 2,6 και 2,5 φορές μεγαλύτεροι αντίστοιχα και οι τιμές A_{max} στη διάρκεια του πειράματος κυμάνθηκαν από 11,9 έως 18,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Σε καλλιέργεια βασιλικού με διαφορετικά μείγματα ενυδρειοπονικού και υδροπονικού διαλύματος ο Roosta, (2014a) ανέφερε μεγαλύτερες τιμές για τις g_s και A_n σε διάλυμα ενυδρειοπονίας – υδροπονίας αναλογίας 2:1, σημαντικά υψηλότερες από τα αντίστοιχα χωρίς αναμείξεις στα διαλύματα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με αυτά της

παρούσας εργασίας, κατά τις δικές μας καταγραφές ο φωτοσυνθετικός ρυθμός ήταν υψηλότερος κατά 7,6, 4,5 και 1,7 φορές συγκριτικά με την καλλιέργεια του σε ενυδραιοπονία, υδροπονία και συνδυασμό ενυδραιοπονίας – υδροπονίας αντίστοιχα, ενώ οι g_s και E ήταν στα ίδια επίπεδα σε όλες τις περιπτώσεις. Σύμφωνα με τους Modarelli et al., (2023), τα διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα υδροπονίας και ενυδραιοπονίας επηρέασαν μόνο την E που ήταν σημαντικά χαμηλότερη στον ενυδραιοπονικά καλλιεργούμενο βασιλικό, ενώ μετά από κοπή του υπέργειου μέρους μειώθηκαν τα A_n , g_s και E κατά 4,7, 1,7 και 1,6 φορές αντίστοιχα ανεξαρτήτως μεταχείρισης.

Οι συγκεντρώσεις των περισσότερων ανόργανων θρεπτικών στο φυτικό ιστό ήταν παρόμοιες μεταξύ μεταχειρίσεων, με μόνες εξαιρέσεις το Mn, Cu, και λιγότερο το Mg και N. Σε σχέση με το τελευταίο, το επίπεδό του στα φύλλα ήταν ελαφρώς (8,2%), αλλά στατιστικώς σημαντικά αυξημένο κατά την δεύτερη κοπή στα φυτά Nettle σε σύγκριση με το Control. Ανάλογη εικόνα παρατηρήθηκε και σε καλλιέργεια βασιλικού με διαφορετικές μεθόδους όπως ενυδραιοπονία και υδροπονία (Modarelli et al., 2023). Η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε όμως στα θρεπτικά συστατικά του φυτικού ιστού ήταν αυτή του Mn που ήταν 2,0 και 1,4 φορές υψηλότερη στην ομάδα Nettle για την 1^η και 2^η κοπή αντίστοιχα. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η τσουκνίδα περιέχει έως 57,4 mg kg⁻¹ Mn ενώ το σογιάλευρο 30,6 - 37,2 mg kg⁻¹ Mn (NRC, 1993; Paulauskienė et al., 2021). Αυτό ενδεχομένως οδήγησε σε μεγαλύτερη διαθεσιμότητα Mn στο θρεπτικό διάλυμα ευνοώντας την απορρόφηση του από τα φυτά βασιλικού. Αντίθετα η αυξημένη συγκέντρωση Cu που καταγράφηκε στα φυτά της ομάδας Control στην 1^η κοπή μπορεί να οφείλεται στην μεγαλύτερη συγκέντρωση στο σογιάλευρο (20,3 mg kg⁻¹) από την τσουκνίδα (13,87 mg kg⁻¹) (NRC, 1993; Paulauskienė et al., 2021). Η παρόμοια θρεπτική σύσταση των φυτών και των δύο μεταχειρίσεων αιτιολογεί και τις παρόμοιες λειτουργικές και αναπτυξιακές τους αποκρίσεις.

Η αντιοξειδωτική ικανότητα του βασιλικού δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την προσθήκη τσουκνίδας στην ιχθυοτροφή, καθώς και οι δύο αντίστοιχοι δείκτες, ολικά φαινολικά και αδρανοποίηση του DPPH, εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μόνη σημαντική εξαίρεση αυτού καταγράφηκε κατά την μέτρηση της 15^{ης} ημέρας στις συγκεντρώσεις ασκορβικού οξέος υπέρ της ομάδας Nettle. Οι συγκεντρώσεις ασκορβικού παρέμειναν γενικώς σε υψηλά και σταθερά επίπεδα καθ' όλη την αναπτυξιακή περίοδο. Αντίθετα, τα ολικά φαινολικά εμφάνισαν μία σαφή τάση μείωσης προϊόντος στην πάροδο του χρόνου και στις δύο μεταχειρίσεις. Αυτό το πιθανότατα αναπτυξιακής βάσης αποτέλεσμα έχει βρεθεί και στην περίπτωση της ενυδραιοπονικής καλλιέργειας σπανακιού που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι αρχικές χρονικά μετρήσεις εμφάνισαν υψηλότερες

συγκεντρώσεις ολικών φαινολικών, ανεξαρτήτως μεταχείρισης, τα οποία όμως συνέχισαν με μία σαφή πτωτική φάση σε μετέπειτα μετρήσεις. Αντίθετα αποτελέσματα έχουν καταγραφεί στη σχετική βιβλιογραφία όταν η τσουκνίδα χρησιμοποιήθηκε ως βιοδιεγέρτης. Σε καλλιέργεια βασιλικού η εφαρμογή σκευάσματος με τσουκνίδα περιεκτικότητας 1% αύξησε τις συγκεντρώσεις των φλαβονοειδών και την αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών αλλά δεν επέφερε κάποια διαφορά στη συγκέντρωση των ολικών φαινολικών σε σχέση με την απουσία βιοδιεγέρτη (Mujezinović et al., 2022). Σε μία άλλη έρευνα με καλλιέργεια βασιλικού ποικιλίας Genovese, οργανικό λίπασμα εμπλουτισμένο με τσουκνίδα (10 %) αύξησε κατά 2,9 φορές την αντιοξειδωτική ικανότητα και κατά 5,3 φορές τα ολικά φαινολικά (Matlok et al., 2019). Αντίθετα, σε ποικιλίες ρίγανης Aereum και Hot & Spicy καταγράφηκε όμοια αντιοξειδωτική ικανότητα από τα διαφορετικά λιπάσματα (παρουσία ή απουσία τσουκνίδας) με την μέθοδο DPPH, όμως οι συγκεντρώσεις ολικών φαινολικών ήταν αυξημένες στην περίπτωση όπου τα φυτά ρίγανης καλλιεργήθηκαν με επιπλέον τσουκνίδα (Matlok et al., 2020).

Ένας από τους κύριους λόγους που καλλιεργείται ο βασιλικός είναι το αιθέριο έλαιο του. Η επίδραση της τσουκνίδας στην απόδοση του βασιλικού σε αιθέριο έλαιο ήταν σημαντική καθώς οδήγησε σε μία κατά 30% μείωση σε σύγκριση με το Control. Αξιοσημείωτη είναι και η διαφορετική ποιοτική σύσταση του ελαίου μεταξύ των μεταχειρίσεων. Εδώ η επίδραση του Nettle ήταν αντίστροφης κατεύθυνσης, καθώς ανιχνεύτηκαν περισσότερες ουσίες συγκριτικά με το Control. Επίσης, σημαντικές διαφοροποιήσεις καταγράφηκαν και στα ποσοστά παρουσίας των διαφόρων συστατικών, με 15 ουσίες να βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα στα φυτά Nettle και μόλις σε μία να υπερτερεί το Control. Το ποσοστό ευκαλυπτόλης, που δίνει το χαρακτηριστικό έντονο άρωμα του βασιλικού αυξήθηκε κατά 85% από την προσθήκη τσουκνίδας στην τροφή των ψαριών. Σε συμφωνία με αυτό είναι και τα αποτελέσματα καλλιέργειας βασιλικού από τους Matlok et al., (2019), όπου η ευκαλυπτόλη ήταν η κύρια ουσία που ενισχύθηκε από οργανικό λίπασμα που περιείχε τσουκνίδα, σε σχέση με τη συμβατική λίπανση, η οποία αύξησε τα επίπεδα ευγενόλης που μειώνει την ένταση του αρώματος σε σχέση με την ευκαλυπτόλη. Στην παρούσα εργασία, η ευκαλυπτόλη ήταν η 5^η κατά σειρά ουσία σε περιεκτικότητα ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό καταγράφηκε για το trans-Methyl cinnamate, το οποίο μειώθηκε στη μεταχείριση Nettle. Το συστατικό αυτό στην ομάδα Control ήταν σε παρόμοια ποσοστά με αυτά που βρέθηκαν στο είδος *Ocimum canum* Sims και *Ocimum basilicum* L. και θεωρείται από τις κύριες ουσίες του βασιλικού που προορίζονται για την βιομηχανία αρωμάτων και τροφίμων (ως ενισχυτικό γεύσης) (Morales et al., 1993; Morsy & Hammad, 2021). Η λιναλόλη ήταν η δεύτερη κατά σειρά ουσία και το ποσοστό της

ενισχύθηκε επίσης στην ομάδα Nettle σε σύγκριση με το Control. Εντούτοις, τα ποσοστά της και στις δύο μεταχειρίσεις ήταν σημαντικά χαμηλότερα και από τις οκτώ ποικιλίες βασιλικού που μελετήθηκαν από τους Sabry et al., (2019), στις οποίες η λιναλόλη κυμάνθηκε μεταξύ 37,25 % - 61,99 % σε σύγκριση με το 11-19% της παρούσας έρευνας. Στην εργασία των Wilson et al., (2017) καταγράφηκαν παρόμοιες ουσίες στο αιθέριο έλαιο βασιλικού, με σημαντικά μεγαλύτερα ποσοστά ευγενόλης και καντινόλης να βρίσκονται στην υδροπονία σε σχέση με την ενυδρειοπονία.

5. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή εναλλακτικών συστατικών στην τροφή των ψαριών είναι απαραίτητη διαδικασία κυρίως για την καλλιέργεια φυτών και ψαριών μέσω της ενυδρειοπονίας, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των οργανισμών που συνυπάρχουν στο σύστημα, με ταυτόχρονη μείωση εισροών με λιπάσματα. Ο στόχος είναι η αναζήτηση του συνδυασμού τροφής που θα επιτρέψει την βέλτιστη ανάπτυξη και ποιότητα των εκτρεφόμενων – καλλιεργούμενων ειδών. Η τσουκνίδα είναι ένα πολλά υποσχόμενο συστατικό για τη σίτιση των ψαριών καθώς είναι σημαντικά τα οφέλη που έχουν ήδη αναδειχθεί από την εφαρμογή της. Στην παρούσα εργασία η χρήση της εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην ενυδρειοπονία αντικαθιστώντας πλήρως το σογιάλευρο. Παρότι οδήγησε σε μία εμφανώς μειωμένη κατανάλωση τροφής από την τιλάπια που επηρέασε την ανάπτυξη της, η επίδρασή της στα λειτουργικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του βασιλικού ήταν όμοια με το Control, όπου χρησιμοποιήθηκε η βέλτιστη τροφή. Και στις δύο μεταχειρίσεις καταγράφηκαν υψηλά επίπεδα παραγωγής βιομάζας βασιλικού και απουσία καταπόνησης του. Η εφαρμογή της τσουκνίδας στο σύστημα είχε σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση αιθέριου ελαίου, την οποία μείωσε αλλά και στην ποιοτική σύσταση αυτού την οποία βελτίωσε. Συνολικά, η παρουσία της τσουκνίδας στην ιχθυοτροφή ενυδρειοπονικής καλλιέργειας αξιολογείται ως θετική εάν ο στόχος είναι η παραγωγή βιομάζας βασιλικού και η εκμετάλλευση συγκεκριμένων συστατικών του αιθέριου ελαίου του. Για την μελλοντική εφαρμογή της τσουκνίδας στην ενυδρειοπονία προτείνεται η περαιτέρω μελέτη με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης συστατικών και ταυτόχρονες φυσιολογικές και θρεπτικές αναλύσεις ώστε να κατανοηθεί πλήρως η επίδραση της στους οργανισμούς που καλλιεργούνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΚΤΡΟΦΗ ΚΟΚΚΙΝΗΣ ΤΙΛΑΠΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΣΙΤΙΣΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΝΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ

1. Εισαγωγή

Η μέντα είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη της οικογένειας Lamiaceae, το οποίο ως αυτοφυές απαντάται στην περιοχή της Μεσογείου και στην Ευρώπη, στην Αυστραλία και στην Βόρεια Αφρική (Salama et al., 2020). Τα πιο διαδεδομένα είδη μέντας που καλλιεργούνται είναι τα *Mentha arvensis*, *Mentha spicata*, *Mentha × piperita*, *Mentha pulegium* και *Mentha requienii* (Gupta et al., 2023). Είναι ένα πολυετές φυτό που το υπέργειο μέρος της μπορεί να έρπεται ή να αυξάνεται καθ' ύψος, το οποίο εξαρτάται από τα είδη, τις υβριδιοποιήσεις και τις ποικιλίες και κυμαίνεται μεταξύ 40 – 120 cm (Salama et al., 2020). Τα φύλλα της μέντας που περιέχουν περίπου 0,2 % αιθέριο έλαιο χρησιμοποιούνται για ανθρώπινη κατανάλωση, ως αφέψημα ή καρύκευμα, ενώ τα αιθέρια έλαια που παρασκευάζονται από ολόκληρο το φυτό χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων και στην κοσμετολογία (Juárez-Rosete et al., 2014). Η μενθόλη αποτελεί το 75% των ουσιών που περιέχονται στο αιθέριο έλαιο της μέντας και χρησιμοποιείται ευρέως για οδοντόκρεμες, στοματικά διαλύματα και στη βιομηχανία φαρμάκων για να παρέχει αντισηπτική, αναισθητική, εφιδρωτική και αντιφλεγμονώδη προστασία. Η μεγαλύτερη παραγωγή μέντας πραγματοποιείται στις Κίνα, Ιαπωνία, και Ινδία όπου καλλιεργούνται πάνω από 2 εκατομμύρια στρέμματα με ετήσια παραγωγή ελαίου που κυμαίνεται από 25.000 – 28.000 τόνους (Gupta et al., 2023). Τα θρεπτικά συστατικά παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών και στην παραγωγή αιθέριου ελαίου και υπολογίζεται ότι κατά την καλλιέργεια μέντας απαιτούνται 180 kg N ha⁻¹, 40 – 80 kg P₂O₅ ha⁻¹, και 275 kg K₂O ha⁻¹ (Juárez-Rosete et al., 2014).

Η μέντα έχει καλλιεργηθεί σε ενυδρειοπονικά συστήματα. Σε πείραμα συγκαλλιέργειας με τιλάπια (*Oreochromis niloticus*) βρέθηκε ότι η πυκνότητα φύτευσης των 6 φυτών m⁻² μεγιστοποιεί την παραγωγή, ενώ η απόδοση σε αιθέριο έλαιο αυξάνεται στην περίπτωση των 8 φυτών m⁻² (Salama et al., 2020). Παράλληλα, σε μία έρευνα με ταυτόχρονη εκτροφή κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), τονίστηκε η σημασία των θρεπτικών συστατικών που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη και την φυσιολογική λειτουργία της μέντας, όπως η προσθήκη καλίου που είναι απαραίτητη για το σύστημα λόγω της ανεπάρκειας του (Roosta, 2014b). Τα θρεπτικά συστατικά που έχουν δοκιμαστεί στην ενυδρειοπονία για την καλλιέργεια μέντας

είναι ο σίδηρος $2 - 3 \text{ mg L}^{-1}$ και το κάλιο στο θρεπτικό διάλυμα σε συγκέντρωση 150 mg L^{-1} ή διαφυλλικά σε μορφή K_2SO_4 για την συμπλήρωση των ελλειμματικών συγκεντρώσεων (Nozzi et al., 2018; Roosta, 2014b).

Στην ενυδραιοπονία, η ισορροπία της παραγωγής των φυτών και των ψαριών στο σύστημα που επιτυγχάνει την κάλυψη των θρεπτικών αναγκών επηρεάζεται καθοριστικά από τον αριθμό των καλλιεργούμενων οργανισμών, την ποσότητα και ποιότητα της τροφής και τον ρυθμό χορήγησης της (Goddek et al., 2015; Lennard & Leonard, 2006). Μέχρι τώρα διαφορετικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την αναλογία φυτών και ψαριών στο σύστημα σχετικά με την επάρκεια τροφής για την κάλυψη των αναγκών των φυτών στα συζευγμένα συστήματα (Endut et al., 2010; Lennard, 2012b; Rakocy et al., 2006) αλλά και στα αποζευγμένα (Goddek et al., 2016). Εντούτοις, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην μέθοδο σίτισης των ψαριών και στη συχνότητα των γευμάτων ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα είτε έλλειψης ή περίσσειας τροφής που αυξάνει το τελικό κόστος της καλλιέργειας.

Γενικότερα στα συστήματα RAS, οι παράμετροι διατροφής των ψαριών όπως είναι η συχνότητα σίτισης και ο αριθμός γευμάτων σε συνδυασμό με την σύσταση των σιτηρεσιών, επηρεάζουν την διαδικασία της πέψης και το μεταβολισμό στα ψάρια, αλλά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού από τα απεκκρίματα των ψαριών και την ποσότητα τροφής που δεν καταλώνεται (Ng & Romano, 2013; Riche & Garling, 2003; Silva et al., 2020). Στην ενυδραιοπονία αυτά τα ζητήματα είναι πιο πολύπλοκα καθώς θα πρέπει επιπλέον να λαμβάνονται υπόψη και οι ρυθμοί απορρόφησης των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά στην διάρκεια της ημέρας (Baganz et al., 2022; Goddek et al., 2015). Ο κερκαδιανός ρυθμός των φυτών στη απορρόφηση θρεπτικών εμπλέκεται στην όλη διαδικασία και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν όταν η καλλιέργεια αναπτύσσεται σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού (McClung, 2006; Tissot et al., 2014). Συγκεκριμένα, η ώρα των γευμάτων και η ποσότητα της τροφής που επιλέγεται θα πρέπει να συμβαδίζει με τις προτιμήσεις των ψαριών αλλά και το διάστημα που τα φυτά απορροφούν ανόργανα θρεπτικά, ώστε το ενυδραιοπονικό σύστημα να είναι πιο αποδοτικό (Eck et al., 2019). Για παράδειγμα, ο ρυθμός αμμωνίας που παράγεται στο σύστημα εξαρτάται από την ποσότητα της τροφής που εισέρχεται, την περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη και την συχνότητα σίτισης των ψαριών (Endut et al., 2014; Hisano et al., 2021). Η βέλτιστη συχνότητα σίτισης εκτός από την ανάπτυξη των ψαριών επιδρά στην μείωση του stress και στην αύξηση της επιβίωσής τους (da Silva et al., 2020; El-Araby et al., 2020).

Η αύξηση των ημερήσιων γευμάτων στα ψάρια τιλάπιας εμφάνισε μία θετική επίδραση στην ανάπτυξη τους αλλά και αυτή των μαρουλιών στην ενυδραιοπονία (Mohamed Abdelrahman, 2018). Σε ενυδραιοπονικό σύστημα με συγκαλλιέργεια τιλάπιας και υδρόβιου

σπανακιού, η αύξηση στη συχνότητα σίτισης βελτίωσε την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων οργανισμών ενώ παράλληλα μείωσε το άζωτο και τον φώσφορο του νερού, γεγονός που συνδέεται με την μεγαλύτερη απορρόφηση τους από τα φυτά (Liang & Chien, 2013). Σύμφωνα με τους da Silva et al., (2020), η σίτιση της τιλάπιας δύο φορές την ημέρα μέχρι κορεσμό ήταν η ιδανικότερη συχνότητα σίτισης για την ανάπτυξη των ψαριών σε σύγκριση με τη σίτιση ενός, τριών ή τεσσάρων γευμάτων την ημέρα. Εντούτοις, στο ίδιο πείραμα η σίτιση των ψαριών στο 75 % του κορεσμού τους ή σε μεγαλύτερες συχνότητες σίτισης αύξησε την πρωτεΐνη στη σάρκα των ψαριών (da Silva et al., 2020). Με βάση τη βιβλιογραφία, το διάστημα που χρειάζεται να μεσολαβήσει μεταξύ των γευμάτων ώστε να επανέλθει η όρεξη σε νεαρά άτομα τιλάπιας όταν σιτίζονται μέχρι κορεσμό είναι τέσσερις ώρες (Riche et al., 2004). Σε ενυδρειοπονικό σύστημα η ανά τέσσερις ώρες σίτιση στην τιλάπια μεγαλύτερου μεγέθους ήταν πιο αποδοτική για τα φυτά και τα ψάρια από τη σίτιση αυτής ανά έξι ή δώδεκα ώρες (Liang & Chien, 2013). Επίσης, η σίτιση νεαρών ατόμων τιλάπιας μέχρι κορεσμό έδειξε μεγαλύτερη ανάπτυξη όταν τα ψάρια έτρωγαν τρεις φορές την ημέρα ανά τέσσερις ώρες ή πέντε φορές απ' ότι μία ή δύο φορές την ημέρα (Riche et al., 2004). Σε άλλο πείραμα, η ανά δύο ώρες σίτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας σε τιλάπια έδειξε καλύτερα αναπτυξιακά αποτελέσματα σε σχέση με την ανά μία ώρα ή σίτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας (Sousa et al., 2012).

Με βάση τα παραπάνω, στο παρόν πείραμα της διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτροφή κόκκινης τιλάπιας (*Oreochromis sp.*) με τρεις διαφορετικές συχνότητες σίτισης: δύο, τρεις και πέντε φορές στην διάρκεια της ημέρας μέχρι κορεσμό, με παράλληλη καλλιέργεια μέντας (*Mentha piperita*) σε ενυδρειοπονία. Στόχος του πειράματος ήταν η αποτύπωση διαφορών στην ανάπτυξη της κόκκινης τιλάπιας από τη χρήση διαφορετικών συχνοτήτων σίτισης αλλά και η επίδραση αυτών στην ανάπτυξη και λειτουργία των φυτών για δύο διαδοχικές κοπές του υπέργειου μέρους τους. Για την καταγραφή των λειτουργικών παραμέτρων των φυτών μετρήθηκε η φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα, η φωτοχημική απόδοση του PSII και η αποδοτικότητα χρήσης του φωτός, ενώ ταυτοχρόνως εκτιμήθηκε η αντιοξειδωτική ικανότητα, η συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών αλλά και τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αιθέριων ελαίων της μέντας. Τέλος, για να ολοκληρωθεί η εικόνα των επιπτώσεων των διαφορετικών πρωτοκόλλων σίτισης καταγράφηκαν φυσικοχημικές παράμετροι του νερού αλλά και η συγκέντρωση των θρεπτικών στο υπέργειο μέρος των φυτών.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Πειραματικός σχεδιασμός και εργαστηριακές συνθήκες

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα εργαστηριακής κλίμακας συστήματα ωφέλιμου όγκου 100 L όπως περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 3.1.) όπου καλλιεργήθηκαν παράλληλα η μέντα (*Mentha piperita*) και η κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis sp.*). Η διάρκεια της καλλιέργειας που ήταν 45 ημέρες επιλέχθηκε με στόχο τα φυτά να φτάσουν στο εμπορεύσιμο μέγεθος για δύο διαδοχικές κοπές του υπέργειου τμήματος. Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι εργαστηριακές συνθήκες διατηρήθηκαν σταθερές με κλιματισμό χώρου ($22,53 \pm 0,12$ °C και $55,80 \pm 0,54$ %). Συνολικά μελετήθηκαν 3 διαφορετικές συχνότητες σίτισης στα ψάρια, όπου κάθε συχνότητα αποτελούσε και μία μεταχείριση και κάθε μεταχείριση πραγματοποιούνταν σε τρία συστήματα, δηλαδή τρεις επαναλήψεις. Οι συχνότητες σίτισης που δοκιμάστηκαν ήταν οι εξής:

- (α) Σίτιση ανά 6 ώρες – Δύο γεύματα την ημέρα (Feeding Frequency - FF2) (10.00 / 16.00)
- (β) Σίτιση ανά 4 ώρες – Τρία γεύματα την ημέρα (FF3) (8.00 / 12.00 / 16.00) και
- (γ) Σίτιση ανά 2 ώρες – Πέντε γεύματα την ημέρα (FF5) (8.00 / 10.00 / 12.00 / 14.00 / 16.00)

Τα διατροφικά αυτά πρωτόκολλα σίτισης επιλέχθηκαν για τους εξής λόγους: η σίτιση της τιλάπιας με δύο γεύματα επιλέχθηκε για την παρακολούθηση της ελάχιστης ποσότητας που θα εισέρχονταν στο σύστημα όπου με βάση την βιβλιογραφία είναι $13 \text{ g τροφής m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$ (Lennard, 2012b). Με δεδομένα τον όγκο του συστήματος, την αρχική βιομάζα των ψαριών και την είσοδο της τροφής από τα προηγούμενα πειράματα η ελάχιστη ημερήσια ποσότητα τροφής που θα έπρεπε να εισέρχεται στο σύστημα υπολογίστηκε σε 2,3 g. Επίσης η μεταχείριση με πέντε γεύματα την ημέρα επιλέχθηκε ως η μέγιστη εισροή τροφής στο σύστημα.

2.2. Θρεπτικό διάλυμα

Καθημερινά πραγματοποιούνταν μετρήσεις της θερμοκρασίας του νερού και του pH ενώ κάθε δύο ημέρες μετρούνταν το DO και η EC με τους αισθητήρες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.3.). Σε εβδομαδιαία βάση μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} και Fe στο νερό με προζυγισμένα αντιδραστήρια HACH, ενώ οι συγκεντρώσεις K, Ca, Na υπολογίστηκαν με τη χρήση φλογοφωτόμετρου και πρότυπων καμπυλών αναφοράς (ακριβώς όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια). Σε όλα τα συστήματα προστέθηκε χηλικός σίδηρος Fe DTPA (GEOLIX EPE, Chelated Iron DTPA 11%) σε ποσότητα που καθορίζονταν από το έλλειμα που προσδιορίζονταν από τις εβδομαδιαίες

μετρήσεις ως προς τον στόχο των 3 mg L^{-1} που θεωρείται η βέλτιστη συγκέντρωση για την μέντα (Nozzi et al., 2018). Η συνολική ποσότητα χηλικού σιδήρου που προστέθηκε ανά μεταχείριση για όλη την καλλιεργητική περίοδο ήταν 19,9, 19,12 και 19,01 g για τις ομάδες FF2, FF3 και FF5 αντίστοιχα, με τις διαφορές να οφείλονται στην διαφορετική απορρόφηση Fe από τα φυτά κάθε μεταχείρισης. Καθημερινά πραγματοποιούνταν μικρή συμπλήρωση νερού (5 %) για την εξισορρόπηση των απωλειών λόγω της εξατμισοδιαπνοής και του καθαρισμού των συστημάτων από τα κόπρανα των ψαριών.

2.3. Συνθήκες εκτροφής ψαριών και μετρήσεις

Οι κόκκινες τιλάπιες εκτράφηκαν για έξι μήνες πριν την είσοδο τους στα συστήματα και προήλθαν από αναπαραγωγή στο εργαστήριο. Συνολικά 90 ιχθύδια κόκκινης τιλάπιας εγκλιματίστηκαν στα ενυδρειοπνικά συστήματα για 15 ημέρες πριν την έναρξη του πειράματος. Τα ψάρια είχαν μέσο αρχικό βάρος $4,25 \pm 0,06 \text{ g}$ και μέσο μήκος $6,42 \pm 0,03 \text{ cm}$ και διαμοιράστηκαν στα εννέα συστήματα με στόχο να μην υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους ως προς το αρχικό τους βάρος. Η αρχική ιχθυοπυκνότητα ήταν $1,16 \text{ kg m}^{-3}$. Η θερμοκρασία των συστημάτων διατηρήθηκε σταθερή με θερμομαντικά μέσα ($22,55 \pm 0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (Ultra heater 100 W, AQUAEL, Πολωνία) και η φωτοπερίοδος ήταν όμοια με αυτή που δέχονταν τα φυτά (14 ώρες φως:10 ώρες σκοτάδι) με ώρες φωτισμού 07:00 – 21:00. Τα ψάρια σιτίζονταν κατά την διάρκεια του πειράματος με εμπορική τροφή (Tetra, Tetra discus granules), όπως και στα πειράματα με το μαρούλι, το σπανάκι και το σταμναγκάθι, έξι ημέρες την εβδομάδα με τις τρεις συχνότητες σίτισης FF2, FF3 και FF5 μέχρι κορεσμό. Καθημερινά και πριν το πρώτο πρωινό γεύμα, συλλέγονταν με σιφονισμό ξεχωριστά για κάθε μεταχείριση τα κόπρανα και τα υπολείμματα διαλυτοποιημένης τροφής. Στη συνέχεια, τα δύο αυτά υλικά διαχωρίζονταν, η τροφή ξηραίνονταν στους $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες και το ξηρό βάρος καταγράφονταν. Η διαφορά του βάρους αυτού από το ξηρό βάρος της τροφής που εισέρχονταν στο σύστημα μάς έδινε την ημερήσια ποσότητα καταναλωθείσας τροφής. Η εκτροφή διήρκεσε 45 ημέρες όπου σε κάθε κοπή των φυτών καταγράφονταν το βάρος και μήκος των ψαριών (Κεφάλαιο 2, Ενότητα 3.1.4) και υπολογίζονταν οι παράμετροι ανάπτυξης WG (g), SGR ($\% \text{ day}^{-1}$), FCR και S (%). Στο τέλος του πειράματος πέντε τιλάπιες από κάθε σύστημα θανατώθηκαν και πραγματοποιήθηκε εξαγωγή του μυϊκού ιστού για τον προσδιορισμό της πρωτεΐνης και του λίπους (Κεφάλαιο 3, Ενότητα 2.4.). Για τις αναλύσεις, τα ξηρά κονιορτοποιημένα δείγματα μυϊκού ιστού από κάθε σύστημα αναμείχθηκαν μεταξύ τους, και τελικά 3 δείγματα / μεταχείριση αναλύθηκαν (Κεφάλαιο 3, Ενότητα 2.2.2. και 2.2.3.).

2.4. Συνθήκες καλλιέργειας φυτών

Για την καλλιέργεια μέντας επιλέχθηκαν 45 νεαρά φυτά μέσου αρχικού βάρους $1,15 \pm 0,08$ g, ύψους $8,91 \pm 0,11$ cm με μέσο αριθμό φύλλων $10,09 \pm 0,16$, τα οποία προήλθαν από φυτώριο της περιοχής. Τα φυτά τοποθετήθηκαν στα πλωτά συστήματα και κάθε μεταχείριση περιλάμβανε 15 φυτά μέντας (5 φυτά / σύστημα). Κατά την καλλιεργητική περίοδο τα φυτά δέχονταν ένταση τεχνητού φωτισμού ίση με $431,23 \pm 4,97 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (μετρητής PPF, Skye Instruments Ltd., UK) με φωτοπερίοδο 14 ώρες φως:10 ώρες σκοτάδι και η θερμοκρασία στο επίπεδο των φυτών ήταν $22,78 \pm 0,02$ °C (CONSORT, T651, Consort bvba, Βέλγιο). Στα φυτά χορηγήθηκε κάλιο σε μορφή K_2O διαφυλλικά (2 ml L^{-1}) (Seisil, SEIPASA S.A., Ισπανία) κάθε 15 ημέρες. Όλοι ψεκασμοί πραγματοποιήθηκαν την ημέρα μετά τις μετρήσεις ή δειγματοληψίες των φυτών.

2.5. Παράμετροι ανάπτυξης φυτών

Η καλλιέργεια είχε ως στόχο τα φυτά να φτάσουν στο εμπορεύσιμο μέγεθος για δύο διαδοχικές κοπές του υπέργειου τμήματος. Η πρώτη κοπή πραγματοποιήθηκε την 22^η ημέρα του πειράματος όπου το υπέργειο τμήμα των φυτών κόπηκε 10 εκατοστά μετρημένα από τη βάση των φυτών, ενώ το ριζικό τους σύστημα παρέμεινε ανέπαφο. Την ημέρα 45 του πειράματος πραγματοποιήθηκε η 2^η κοπή που αποτελούσε και την τελική συγκομιδή των φυτών. Και στις δύο κοπές των φυτών μετρήθηκε το νωπό και ξηρό βάρος υπέργειου, το ύψος του υπέργειου, ο αριθμός πλάγιων κλάδων, ο αριθμός φύλλων, ο δείκτης ξηροφυλλίας LSM (g dm^{-2}) και υπολογίστηκε η φυλλική επιφάνεια μέσω ανάλυσης εικόνων (ImageJ, λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ImageJ.net/version. ImageJ 1.51j, ΗΠΑ). Επίσης, στην 2^η κοπή μετρήθηκε και το ξηρό βάρος της ρίζας και υπολογίστηκαν η αναλογία υπόγειας προς υπέργειας ξηρής βιομάζας, και η νωπή παραγωγή του υπέργειου (g m^{-2}).

2.6. Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών αποτυπώθηκαν σε εβδομαδιαία βάση και στην ημέρα την τελικής συγκομιδής των φυτών. Τα δείγματα λήφθηκαν από ώριμα φύλλα μέντας και κάθε μεταχείριση είχε 6 επαναλήψεις. Τα δείγματα εκχυλίστηκαν και οι τελικές συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών υπολογίστηκαν όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.7.1..

2.7. PRI

Ο δείκτης ανακλαστικότητας PRI μελετήθηκε σε ένα ώριμο φύλλο για όλα τα φυτά μέντας (15 επαναλήψεις/μεταχείριση) με το όργανο PlantPen. Οι μετρήσεις λήφθηκαν πριν το άνοιγμα του τεχνητού φωτισμού και η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.7.2.

2.8. Φθορισμός της χλωροφύλλης *a in vivo*

Για τις μετρήσεις φθορισμού της χλωροφύλλης *a* χρησιμοποιήθηκε το όργανο HandyPea και μετρήθηκε ένα ώριμο φύλλο από κάθε φυτό (15 επαναλήψεις/μεταχείριση). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εβδομαδιαία βάση τις ημέρες 7, 14, 22, 18, 35 και πριν την τελική συγκομιδή των φυτών την ημέρα 45. Για την εκτίμηση του PSII χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.3. και Πίνακας 3).

2.9. Ανταλλαγή αερίων και LCs

Ο φωτοσυνθετικός ρυθμός, η στοματική αγωγιμότητα και ο ρυθμός διαπνοής καταγράφονταν σε εβδομαδιαίες μετρήσεις, δηλαδή τις ημέρες 7, 14, 22, 28, 35 και πριν την τελική κοπή ημέρα 45. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν με το φορητό όργανο (LI-6400 XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA) και με την μέθοδο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.1.7.4) σε 6 φυτά ανά μεταχείριση και από κάθε φυτό μετρήθηκε ένα ώριμο φύλλο. Η μέση ένταση φωτός στο εσωτερικό του θαλάμου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ρυθμίστηκε στα $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Οι LCs μετρήθηκαν στην αρχή του πειράματος (ημέρα 7) και πριν από κάθε κοπή (ημέρες 22 και 45) και το πρωτόκολλο φωτισμού των φύλλων περιλάμβανε 11 διαφορετικές εντάσεις ($1200, 1000, 800, 600, 400, 200, 100, 80, 50, 20$ και $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ένα ώριμο φύλλο από 4 φυτά ανά μεταχείριση, και προέκυψαν οι παράμετροι A_{max} , a και R_d (Ενότητα 2.1.7.4).

2.10. Θρέψη φυτών

Τα ανόργανα θρεπτικά στον φυτικό ιστό μετρήθηκαν με την μέθοδο ICP εκτός από την συγκέντρωση νατρίου που μετρήθηκε με φλογοφωτόμετρο. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν μετά από κάθε κοπή για τα φυτά και εφαρμόστηκαν τα πρωτόκολλα που περιγράφηκαν προηγουμένως (Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.7.5.) με την διαφορά ότι το νάτριο υπολογίστηκε από την εξίσωση της πρότυπης καμπύλης:

$$\text{Απορρόφηση} = 9,514 \times \text{Συγκέντρωση Na} + 27,326 \quad R^2 = 0,9417$$

2.11. Αντιοξειδωτική ικανότητα

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών μέντας μελετήθηκε σύμφωνα με όσα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.1.7.6, στις πειραματικές ημέρες 10, 22, 35 και 45. Για την μέθοδο ολικών φαιολικών (Folin-Ciocalteu) χρησιμοποιήθηκαν 250 mg ξηρού ιστού για κάθε δείγμα ενώ για την μέθοδο DPPH, χρησιμοποιήθηκαν παγωμένα δείγματα και εκχυλίστηκαν 150 mg μέντας σε 25 ml μεθανόλης (6 δείγματα ανά μεταχείριση). Πριν την ανάλυση τα δείγματα αραιώθηκαν είκοσι φορές με μεθανόλη και στη συνέχεια αντέδρασαν με το διάλυμα DPPH (100 μM) σε όγκους όπως στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Οι απορροφήσεις μετατράπηκαν σε ισοδύναμα ασκορβικού οξέος με την πρότυπη καμπύλη αναφοράς:

$$A_{517\text{nm}} = -0,0008 \times \text{Ασκορβικό οξύ} + 1,2125 \quad R^2 = 0,9975$$

2.12. Αιθέρια έλαια

Η ανάλυση των αιθέριων ελαίων πραγματοποιήθηκε στο τέλος του πειράματος από αεροξηραμένα δείγματα της 2^{ης} κοπής των φυτών για την κάθε μεταχείριση. Συνολικά για κάθε μεταχείριση παρασκευάστηκαν 3 δείγματα αιθέριων ελαίων, ως εξής: 12 g ξηρού ιστού τοποθετήθηκαν σε συσκευή διάταξης τύπου Clevenger και υδροατμοαποστάχθηκαν για 3 ώρες. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η απόδοση τους μετρώντας τον όγκο (ml) του αιθέριου ελαίου, και ακολουθήθηκε η διαδικασία για την προετοιμασία των δειγμάτων, τις αναλύσεις με GC – MS και τον προσδιορισμό των ουσιών με την βιβλιοθήκη NIST που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, Ενότητα 2.13.

2.13. Στατιστική ανάλυση

Όλα τα δεδομένα αναλύθηκαν με τη χρήση one-way ANOVA, με έλεγχο Tukey post hoc για τις παραμέτρους στις οποίες ίσχυαν οι προϋποθέσεις της ANOVA. Όπου η one-way ANOVA δεν μπορούσε να εφαρμοστεί (PRI, παράμετροι φθορισμού και λόγοι παραμέτρων) χρησιμοποιήθηκε μη παραμετρικός έλεγχος Kruskal–Wallis και το post-hoc test Dunn ($p \leq 0,05$). Για όλες τις στατιστικές αναλύσεις το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο $p \leq 0,05$ και πραγματοποιήθηκαν με το ελεύθερο λογισμικό JASP v.0.16 (JASP Team 2021 Computer Software).

3. Αποτελέσματα

3.1. Θρεπτικό διάλυμα

Οι διαφορετικές συχνότητες σίτισης στα ψάρια δεν επηρέασαν την ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος, καθώς όμοιες τιμές καταγράφηκαν για όλα τα θρεπτικά συστατικά που μελετήθηκαν (Πίνακας 22). Το pH των συστημάτων διατηρήθηκε στις βέλτιστες τιμές για την ενυδρείοπονία χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων. Ελαφρώς λιγότερο DO της τάξης του 1% καταγράφηκε στην ομάδα με τα περισσότερα γεύματα (FF5) συγκριτικά με την ομάδα με τα λιγότερα γεύματα (FF2), με τη διαφορά ωστόσο να είναι στατιστικώς σημαντική, όμως η μεταχείριση FF3 δεν διέφερε από τις άλλες δύο. Οι τιμές των νιτρικών κυμάνθηκαν από 95,74 έως 107,21 mg L⁻¹ και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στην μεταχείριση με τα περισσότερα γεύματα χωρίς να εμφανίζονται σημαντικές διαφορές. Η μέση συγκέντρωση του σιδήρου στο θρεπτικό διάλυμα για όλη την καλλιεργητική περίοδο όπως προέκυψε από τις εβδομαδιαίες αναλύσεις ήταν 1,97 – 2,01 mg L⁻¹ και οι διαφορές από τον στόχο (3 mg L⁻¹) οφείλονται στην απορρόφηση από τα φυτά. Σε καμία άλλη χημική παράμετρο του νερού από αυτές που μετρήθηκαν δεν καταγράφηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Πίνακας 22. Φυσικοχημικές παράμετροι του νερού κατά την πειραματική περίοδο (Μέσοι όροι ± SEM, n = 120 για pH, n = 63 για DO και EC, n = 21 για NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Fe, K, Ca²⁺ και Na). Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων (p ≤ 0,05).

	FF2	FF3	FF5
pH	7,60 ± 0,02 ^a	7,62 ± 0,01 ^a	7,61 ± 0,02 ^a
DO (mg L ⁻¹)	8,23 ± 0,02 ^a	8,21 ± 0,02 ^{ab}	8,16 ± 0,02 ^b
EC (μS cm ⁻¹)	940,92 ± 23,77 ^a	944,86 ± 24,35 ^a	966,40 ± 26,63 ^a
NH ₃ (mg L ⁻¹)	0,06 ± 0,01 ^a	0,05 ± 0,01 ^a	0,05 ± 0,01 ^a
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	0,15 ± 0,04 ^a	0,14 ± 0,02 ^a	0,15 ± 0,04 ^a
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	95,74 ± 6,26 ^a	97,09 ± 3,74 ^a	107,21 ± 7,54 ^a
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	11,78 ± 1,93 ^a	11,69 ± 1,84 ^a	12,12 ± 1,75 ^a
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	32,33 ± 1,65 ^a	31,90 ± 1,60 ^a	32,81 ± 1,68 ^a
Fe (mg L ⁻¹)	1,97 ± 0,18 ^a	2,01 ± 0,18 ^a	2,01 ± 0,18 ^a
K (mg L ⁻¹)	2,77 ± 0,69 ^a	2,49 ± 0,61 ^a	2,18 ± 0,53 ^a
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	48,43 ± 3,24 ^a	48,81 ± 3,30 ^a	50,52 ± 3,46 ^a
Na (mg L ⁻¹)	73,27 ± 3,53 ^a	72,98 ± 3,59 ^a	74,28 ± 3,65 ^a

3.2. Ανάπτυξη ψαριών

Οι συχνότητες σίτισης που εφαρμόστηκαν στο πείραμα δεν επηρέασαν το μέσο βάρος, το μέσο μήκος, την παραγωγή και τα ποσοστά επιβίωσης των ψαριών καθώς δεν

καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων την ημέρα 22 (1^η κοπή) και την ημέρα 45 (2^η κοπή) (Πίνακας 23). Αντίθετα, μία σημαντική αύξηση στην ημερήσια ποσότητα τροφής που καταναλώθηκε παρατηρήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, στην ομάδα FF5 συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις ήδη από την 1^η κοπή και το ίδιο πρότυπο συνεχίστηκε έως και την 2^η κοπή. Αυτό το χαρακτηριστικό όμως, δεν επηρέασε τον ειδικό ρυθμό αύξησης SGR ο οποίος εμφάνισε υψηλές τιμές για την κόκκινη τιλάπια. Αντίθετα, ο δείκτης FCR των ψαριών εμφάνισε βέλτιστες τιμές και για τις δύο κοπές στην ομάδα FF5, και ήταν σημαντικά μεγαλύτερες από τις FF2 και FF3, οι οποίες δεν διέφεραν μεταξύ τους. Παράλληλα, η περιεκτικότητα πρωτεΐνης στην σάρκα των ψαριών ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στις μικρότερες συχνότητες σίτισης, σε αντίθεση με το FF5 που εμφάνισε τις ελάχιστες τιμές. Οι μεταχειρίσεις δεν επηρέασαν τα ποσοστά λίπους στη σάρκα των ψαριών.

Πίνακας 23. Παράμετροι ανάπτυξης της κόκκινης τιλάπιας στην 1^η και 2^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 30$ για το βάρος, μήκος, WG, SGR, FCR, επιβίωση, $n = 60$ για ημερήσια κατανάλωση τροφής, $n = 3$ για παραγωγή, πρωτεΐνη, λίπος). Οι διαφορετικοί εκθέτες υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων για κάθε κοπή ξεχωριστά ($p \leq 0,05$).

	1 ^η κοπή			2 ^η κοπή		
	FF2	FF3	FF5	FF2	FF3	FF5
Βάρος (g)	14,12 \pm 0,59 ^a	15,26 \pm 0,55 ^a	15,36 \pm 0,56 ^a	29,41 \pm 1,63 ^a	29,85 \pm 1,51 ^a	31,05 \pm 1,19 ^a
Μήκος (cm)	9,13 \pm 0,12 ^a	9,43 \pm 0,11 ^a	9,31 \pm 0,11 ^a	11,49 \pm 1,10 ^a	11,63 \pm 0,19 ^a	11,63 \pm 0,14 ^a
Παραγωγή (kg m ⁻³)	3,82 \pm 0,37 ^a	3,85 \pm 0,41 ^a	4,01 \pm 0,21 ^a	6,62 \pm 1,05 ^a	6,45 \pm 0,68 ^a	8,11 \pm 0,74 ^a
Ημερήσια κατανάλωση τροφής (g day ⁻¹)	4,13 \pm 0,20 ^b	4,35 \pm 0,19 ^b	4,95 \pm 0,19 ^a	5,81 \pm 0,23 ^b	5,49 \pm 0,17 ^b	7,32 \pm 0,27 ^a
WG (g)	9,89 \pm 0,53 ^a	10,95 \pm 0,46 ^a	11,10 \pm 0,46 ^a	25,12 \pm 1,58 ^a	25,47 \pm 1,41 ^a	26,80 \pm 1,10 ^a
SGR (% day ⁻¹)	5,38 \pm 0,16 ^a	5,70 \pm 0,10 ^a	5,81 \pm 0,10 ^a	4,20 \pm 0,11 ^a	4,21 \pm 0,08 ^a	4,40 \pm 0,06 ^a
FCR	0,90 \pm 0,06 ^b	0,78 \pm 0,04 ^b	0,97 \pm 0,05 ^a	1,15 \pm 0,08 ^a	0,98 \pm 0,06 ^a	1,01 \pm 0,05 ^a
Επιβίωση (%)	100,00 ^a	93,33 ^a	96,67 ^a	83,33 ^a	80,00 ^a	96,67 ^a
Πρωτεΐνη (%)	–	–	–	88,12 \pm 0,23 ^a	87,93 \pm 0,22 ^a	86,71 \pm 0,33 ^b
Λίπος (%)	–	–	–	1,65 \pm 0,54 ^a	1,89 \pm 0,22 ^a	1,98 \pm 0,06 ^a

3.3. Αναπτυξιακές και λειτουργικές παράμετροι της μέντας

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα αναπτυξιακά αποτελέσματα της μέντας κατά την 1^η και 2^η κοπή. Οι διαφορετικές συχνότητες σίτισης δεν επηρέασαν καμία αναπτυξιακή παράμετρο που μελετήθηκε. Τα φυτά μέντας εμφάνισαν γρήγορη προσαρμογή στα συστήματα ενυδρείοπονίας και η ανάπτυξη τους ήταν πολύ γρήγορη επιτυγχάνοντας εμπορεύσιμο μέγεθος

σε μόλις 22 ημέρες μετά την έναρξη του πειράματος (Εικόνα 19). Τα φυτά κόπηκαν σε ύψος 10 εκατοστών και επιτεύχθηκε ακόμη μεγαλύτερη παραγωγή μετά από άλλες 22 ημέρες που τα φυτά συγκομίστηκαν, όπως φαίνεται τόσο από την αύξηση της νωπής και ξηρής βιομάζας στη 2^η κοπή. Η παραγωγή στην 1^η κοπή κυμάνθηκε από 1,1 έως 1,2 kg m⁻² και στην 2^η κοπή τα φυτά μέντας κατέγραψαν επιπλέον αύξηση φτάνοντας τα 1,7 – 1,9 kg m⁻². Η συνέχιση στην ανάπτυξη της ρίζας μετά την 1^η κοπή υποστήριξε και την μεγαλύτερη ανάπτυξη κατά την 2^η κοπή. Το αποτέλεσμα είναι περισσότερα σε αριθμό φύλλα και πλάγιοι κλάδοι, υψηλότερα φυτά, εντούτοις με παρόμοια φυλλική επιφάνεια και LSM, στην 2^η κοπή συγκριτικά με την 1^η.

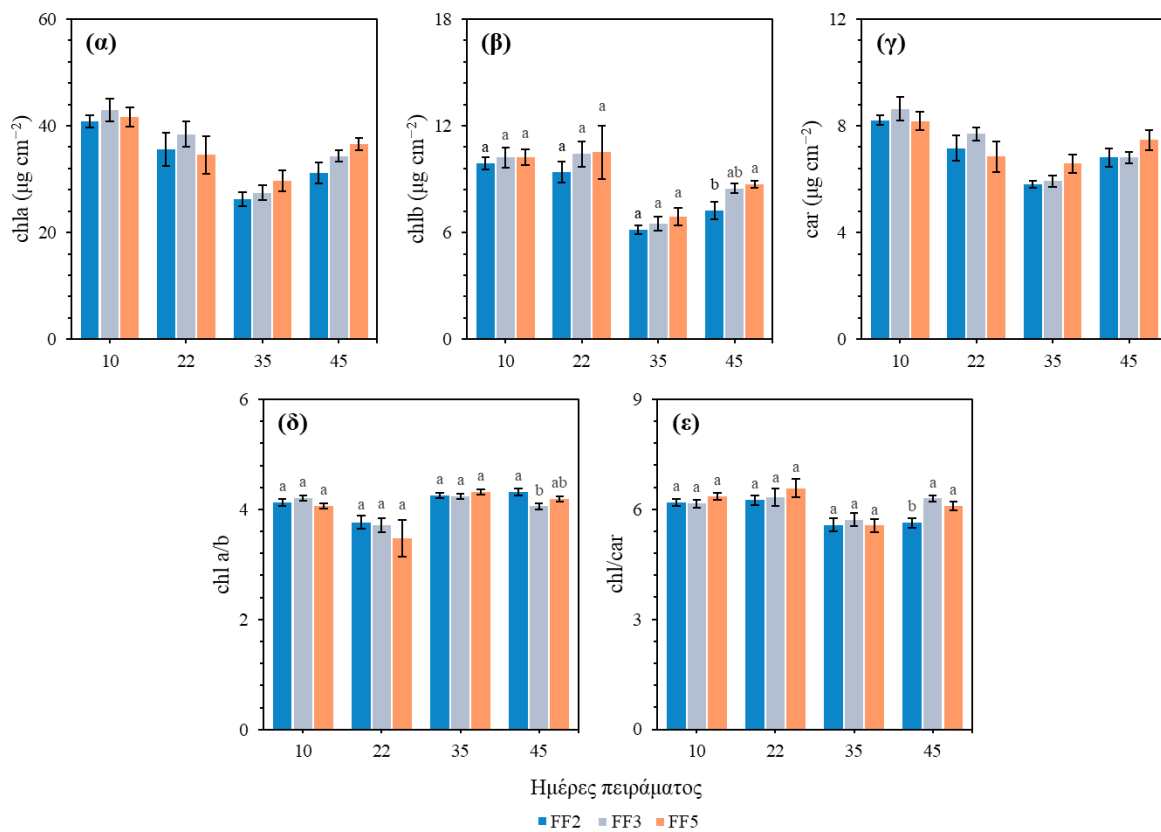
Πίνακας 24. Παράμετροι ανάπτυξης στην μέντα στην 1^η και 2^η κοπή των φυτών (Μέσοι όροι ± SEM, n = 15). Η απουσία διαφορετικών εκθετών σημαίνει μη σημαντικές διαφορές (p ≤ 0,05).

	1 ^η κοπή			2 ^η κοπή		
	FF2	FF3	FF5	FF2	FF3	FF5
Νωπό βάρος υπέργειου (g)	42,78 ± 1,65	43,58 ± 1,37	41,02 ± 2,39	64,76 ± 5,12	69,99 ± 5,59	70,16 ± 5,80
Ξηρό βάρος υπέργειου (g)	5,60 ± 0,32	5,41 ± 0,21	5,31 ± 0,31	6,74 ± 0,54	7,01 ± 0,56	6,76 ± 0,57
Ξηρό βάρος υπόγειου (g)	–	–	–	2,13 ± 0,15	2,06 ± 0,10	2,15 ± 0,09
Υπόγειο / Υπέργειο	–	–	–	0,35 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,37 ± 0,03
Παραγωγή (g m ⁻²)	1188,39 ± 101,66	1210,60 ± 18,04	1139,41 ± 56,81	1798,85 ± 274,43	1944,14 ± 210,65	1948,92 ± 49,27
Αριθμός φύλλων	104,87 ± 2,85	103,13 ± 3,05	102,13 ± 3,89	165,87 ± 9,92	155,27 ± 10,02	157,93 ± 10,21
Φυλλική επιφάνεια (cm ²)	841,29 ± 37,08	862,29 ± 36,36	780,99 ± 53,43	828,49 ± 84,79	857,61 ± 100,99	826,68 ± 87,19
LSM (g dm ⁻²)	0,73 ± 0,12	0,54 ± 0,06	0,51 ± 0,08	0,67 ± 0,08	0,53 ± 0,08	0,59 ± 0,10
Ύψος φυτών (cm)	40,87 ± 0,57	41,20 ± 0,47	40,33 ± 0,99	50,17 ± 2,88	49,77 ± 2,51	48,83 ± 2,52
Αριθμός πλάγιων κλάδων (no)	15,47 ± 0,31	16,27 ± 0,55	16,00 ± 0,48	49,07 ± 3,91	54,00 ± 4,04	52,93 ± 4,82



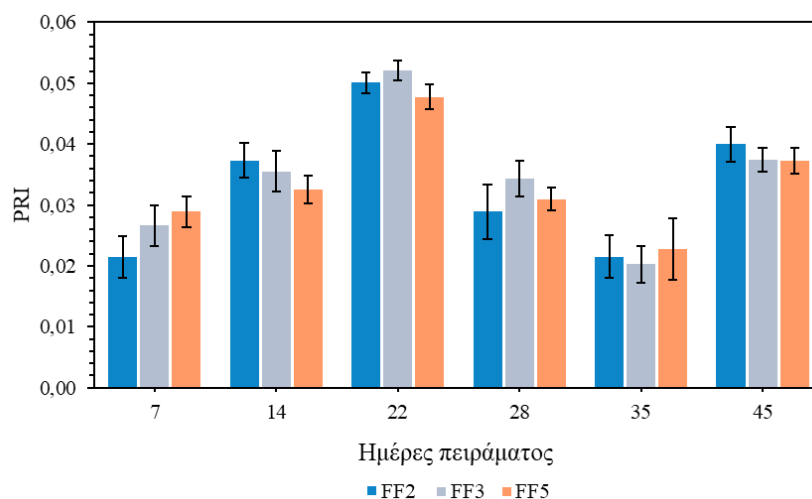
Εικόνα 19. Καλλιέργεια μέντας σε πλωτά συστήματα ενυδρείοπονίας (α) πριν την 1^η κοπή των φυτών και (β) πριν την 2^η κοπή των φυτών.

Οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης a και των καροτενοειδών δεν επηρεάστηκαν από τις συχνότητες σίτισης και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων στις διαφορετικές ημερομηνίες που μελετήθηκαν (Γράφημα 24). Αντίθετα, στην τελική συγκομιδή των φυτών καταγράφηκε μία σημαντική αύξηση στην χλωροφύλλη b της μέντας στην ομάδα FF5 σε σχέση με την ομάδα FF2, όμως η ομάδα FF3 δεν διέφερε σημαντικά από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Και για τις τρεις φωτοσυνθετικές χρωστικές παρατηρήθηκε μία ελαφρά πτώση μετά την 1^η κοπή η οποία εξισορροπήθηκε πριν την συγκομιδή των φυτών την ημέρα 45 του πειράματος και πιθανώς οφείλεται στην διαφορετική αναπτυξιακή φάση του φυτού. Παράλληλα, σταθερά επίπεδα chl a/b παρατηρήθηκε μέχρι την τελική συγκομιδή των φυτών όπου η ομάδα FF2 κατέγραψε σημαντικά μεγαλύτερο λόγο από την ομάδα FF3, όμως η ομάδα FF5 είχε παρόμοιες τιμές με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Αντίστοιχα σταθερά ήταν τα επίπεδα του chl/car κατά τη διάρκεια του πειράματος, όμως στην 2^η κοπή των φυτών η FF2 εμφάνισε μειωμένες τιμές σε σύγκριση με τις άλλες δύο ομάδες, αντανakλώντας τις μειωμένες συγκεντρώσεις chl b στην συγκεκριμένη ημερομηνία.



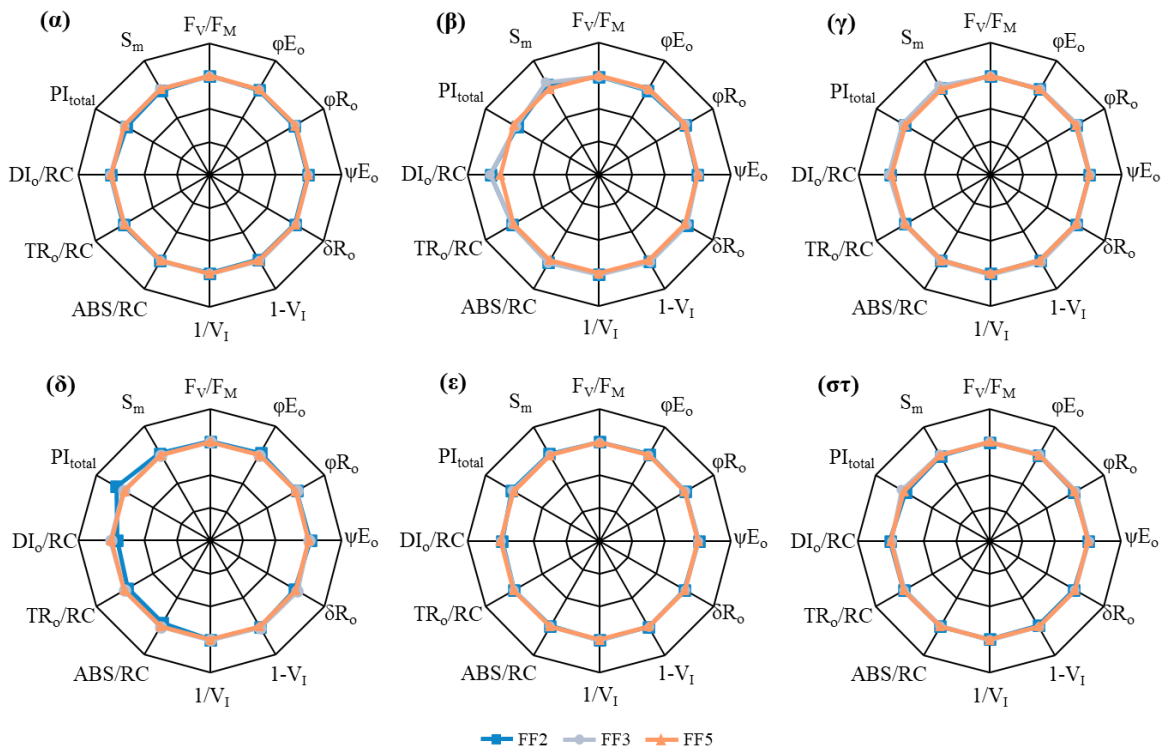
Γράφημα 24. Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και οι μεταξύ τους αναλογίες κατά την πειραματική περίοδο στην μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 6$), (α) chl a, (β) chl b, (γ) car, (δ) λόγος chl a/b, (ε) λόγος chl a/car. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$) και η απουσία γραμμάτων στα (α) και (γ) υποδηλώνει μη σημαντικές διαφορές.

Στον δείκτη PRI δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών συχνοτήτων σίτισης που δοκιμάστηκαν σε καμία ημερομηνία κατά την εξέλιξη του πειράματος (Γράφημα 25). Οι μεγαλύτερες τιμές του PRI καταγράφηκαν όταν τα φυτά έφτασαν στο εμπορεύσιμο μέγεθος τους (ημέρες 22 και 45) όπου και πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες κοπές. Μία μείωση του δείκτη PRI καταγράφηκε μετά την 1^η κοπή και μέχρι την 5^η εβδομάδα της καλλιέργειας, αντίστοιχη με αυτή που παρατηρήθηκε και στις συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών παραπάνω.



Γράφημα 25. Τιμές του δείκτη PRI από τις εβδομαδιαίες μετρήσεις στη μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 15$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα ($p \leq 0,05$).

Τα αποτελέσματα του φθορισμού της χλωροφύλλης α παρουσιάζονται στο Γράφημα 26. Το FF5 για την τιλάπια είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης ανά φωτόνιο απόδοσης της φωτοχημείας του PSII (F_v/F_m) σε σχέση με τα FF2 και FF3 την δεύτερη εβδομάδα της καλλιέργειας. Την ίδια χρονική στιγμή, στην ομάδα FF5 μειώθηκαν σημαντικά οι ειδικές ενεργειακές ροές ανά κέντρο αντίδρασης, και συγκεκριμένα η απορροφώμενη ενέργεια ABS/RC και η ενέργεια θερμικής απόσβεσης DI_o/RC συγκριτικά με τις αυτές των μεταχειρίσεων FF2 και FF3. Την ημέρα πριν την 1^η κοπή των φυτών το απόθεμα των πρωτογενών αποδεκτών $e^-(Q_A)$ του PSII, που δίνεται από την παράμετρο S_m ήταν σημαντικά υψηλότερο στην ομάδα FF3 σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Επίσης, μία εβδομάδα μετά την 1^η κοπή των φυτών (ημέρα 28) στην ομάδα FF2 παρατηρήθηκαν σημαντικά μειωμένοι λόγοι ABS/RC και TR_o/RC που σχετίζονται με την απορροφώμενη και την συλληφθείσα ενέργεια ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης αντίστοιχα, σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με τρία και πέντε γεύματα την ημέρα. Τις δύο τελευταίες εβδομάδες της καλλιέργειας δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων για τις παραμέτρους του φθορισμού που μελετήθηκαν.

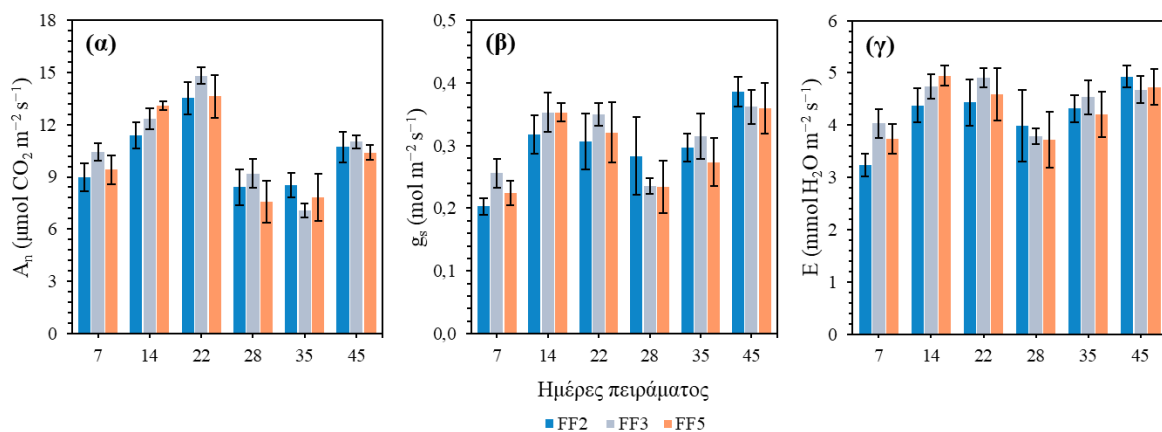


	F_v/F_M	ϕE_o	ϕR_o	ψE_o	δR_o	$1-V_I$	$1/V_I$	ABS/RC	TR _o /RC	DI _o /RC	PI _{total}	S _m
7	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
14	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***	n.s.	***	n.s.	n.s.
22	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**
28	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.
35	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
45	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

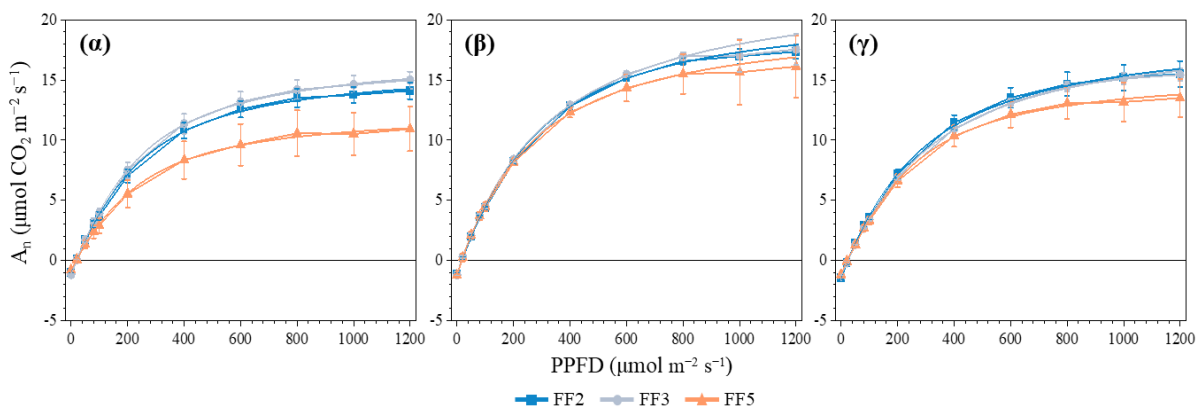
Γράφημα 26. Αραχνοειδή γραφήματα των παραμέτρων που προέρχονται από τις καμπύλες OJIP του φθορισμού της chl a στην μέντα (μέσοι όροι, $n = 15$) από τις μετρήσεις: (α) ημέρα 7, (β) ημέρα 14, (γ) ημέρα 22, (δ) ημέρα 28, (ε) ημέρα 35 και (στ) ημέρα 45. Οι τιμές κανονικοποιήθηκαν στις τιμές της ομάδας FF5. Τα στατιστικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και ημέρα παρουσιάζονται στον πίνακα (n.s. σημαίνει μη σημαντικές διαφορές, το * υποδεικνύει διαφορές της ομάδας FF2 με τις ομάδες FF3 και FF5, το ** διαφορές της ομάδας FF3 με τις ομάδες FF2 και FF5, το *** διαφορές της ομάδας FF5 με τις ομάδες FF2 και FF3 σε $p \leq 0,05$).

Κατά την διάρκεια του πειράματος δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων στο A_n , τη g_s αλλά και τον E (Γράφημα 27). Μία αυξητική τάση καταγράφηκε στις παραμέτρους που μελετήθηκαν μέχρι την 1^η κοπή των φυτών όπου το A_n έφτασε σε υψηλά επίπεδα και κυμάνθηκε από $13,53 - 14,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Μία εβδομάδα μετά την κοπή το A_n ήταν μειωμένο κατά 60-80%, ενώ η μεγαλύτερη μείωση καταγράφηκε την ημέρα 35 στην ομάδα FF3 που είχε υποδιπλάσιες τιμές από την ημέρα 22. Τελικά, την ημέρα πριν την συγκομιδή το A_n ήταν αυξημένο σε σχέση με τις αμέσως προηγούμενες ημέρες, δεν έφτασε όμως τις τιμές πριν την 1^η κοπή. Η διακύμανση των g_s και E ήταν ελαφρώς διαφορετική από του A_n . Μετά τις χαμηλές τιμές της έναρξης του πειράματος (ημέρα 7) και της 1^{ης} μέτρησης μετά την κοπή (ημέρα 28) παρατηρήθηκε μία σταδιακή αύξηση μέχρι τις μέγιστες τιμές αμέσως πριν τις κοπές, χωρίς διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων, όπως προαναφέρθηκε.

Αντίστοιχη εικόνα παρατηρήθηκε στις καμπύλες LCs (Γράφημα 28) καθώς δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στο A_{max} και στην ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) κατά την αρχή του πειράματος και πριν τις δύο κοπές. Είναι, εντούτοις, φανερή μία τάση της FF5 για χαμηλότερες φωτοσυνθέσεις από αρκετά χαμηλές εντάσεις φωτός μέχρι τις μέγιστες, κάτι που αποτυπώθηκε και στην τάση για χαμηλότερες A_{max} . Η μοναδική σημαντική διαφορά που αποτυπώθηκε αφορούσε την Rd της ημέρας 7 του πειράματος όπου η ομάδα FF5 είχε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από την ομάδα FF2, όμως η ομάδα FF3 δεν διέφερε από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Τις ημέρες 22 και 45 η παράμετρος Rd ήταν όμοια μεταξύ των μεταχειρίσεων.



Γράφημα 27. Μετρήσεις ανταλλαγής αερίων κατά την πειραματική περίοδο για την μέντα. (α) φωτοσυνθετικός ρυθμός (A_n), (β) στοματική αγωγιμότητα (g_s), (γ) ρυθμός διαπνοής (E) (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 6$). Η απουσία γραμμιάτων δείχνει μη σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ($p \leq 0,05$).



Ημέρες πειράματος	A_{max}			α			Rd		
	FF2	FF3	FF5	FF2	FF3	FF5	FF2	FF3	FF5
7	15.80 \pm 0.81	16.93 \pm 0.67	12.24 \pm 2.01	0.05 \pm 0.004	0.06 \pm 0.005	0.04 \pm 0.008	-0.91 \pm 0.08 ^b	-1.09 \pm 0.06 ^b	-0.74 \pm 0.07 ^a
22	19.54 \pm 0.85	19.87 \pm 1.81	18.36 \pm 3.53	0.06 \pm 0.001	0.06 \pm 0.001	0.06 \pm 0.001	-1.00 \pm 0.06 ^a	-1.01 \pm 0.12 ^a	-1.06 \pm 0.21 ^a
45	17.86 \pm 1.26	17.87 \pm 0.60	15.28 \pm 1.93	0.06 \pm 0.002	0.05 \pm 0.001	0.05 \pm 0.006	-1.35 \pm 0.09 ^a	-1.24 \pm 0.08 ^a	-1.08 \pm 0.19 ^a

Γράφημα 28. Καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από το φως για την μέντα (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 4$). (α) Ημέρα 7, (β) Ημέρα 22, (γ) Ημέρα 45. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης (A_{max}), η ανά φωτόνιο απόδοση της φωτοσύνθεσης (α) και η σκοτεινή μιτοχονδριακή αναπνοή (Rd). Διαφορετικά γράμματα

υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ημέρα και η απουσία γραμμάτων μη σημαντικές διαφορές για κάθε ημέρα ($p \leq 0,05$).

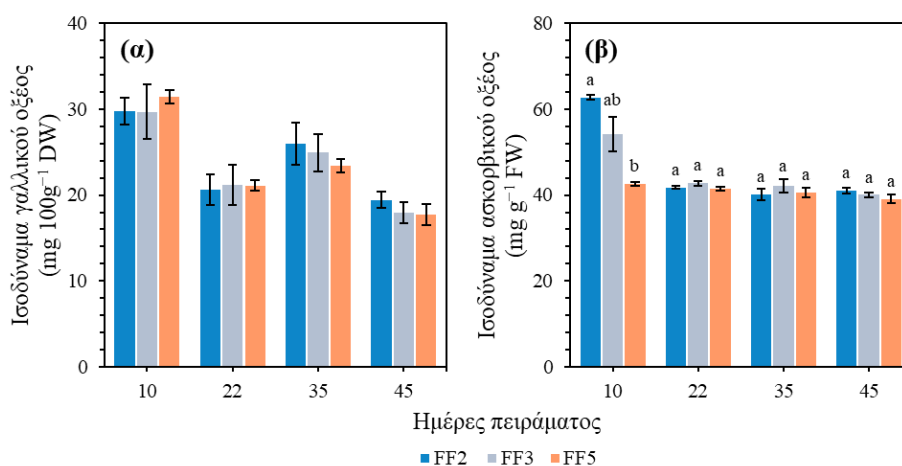
Τα αποτελέσματα για την θρεπτική κατάσταση της μέντας κατά τις δύο κοπές παρουσιάζονται στον Πίνακα 25. Στην πρώτη κοπή δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων για τα δέκα θρεπτικά συστατικά που μελετήθηκαν. Παρόμοια ήταν η εικόνα για τα εννιά από τα δέκα στοιχεία και στην 2^η κοπή, με την εξαίρεση του Mn, για το οποίο παρατηρήθηκε μία σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του στα φυτά της ομάδας FF5. Συγκεκριμένα τα επίπεδα Mn στην ομάδα FF5 ήταν κατά 56% υψηλότερα από της ομάδας FF2. Η ομάδα FF3 εμφάνισε ενδιάμεσες συγκεντρώσεις Mn μεταξύ των FF2 και FF3, χωρίς σημαντικές διαφορές από αυτές, έχοντας κατά 30% λιγότερο από την FF5.

Πίνακας 25. Θρεπτική σύσταση των φύλλων μέντας στην 1^η και 2^η κοπή (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 3$). Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών N, P, K, Ca, Mg εκφράζονται ως % ξηρού βάρους φύλλου, του Na ως mg g^{-1} ξηρού ιστού και των Fe, Zn, Mn, Cu ως ppm ξηρού βάρους. Διαφορετικοί εκθέτες στη σειρά υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων στην 2^η κοπή, ενώ η απουσία γραμμάτων στην 1^η κοπή υποδηλώνει μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).

		1 ^η κοπή			2 ^η κοπή		
		FF2	FF3	FF5	FF2	FF3	FF5
N		3,64 \pm	3,49 \pm	3,48 \pm	3,32 \pm	3,60 \pm	3,51 \pm
		0,13	0,02	0,11	0,08 ^a	0,18 ^a	0,04 ^a
P		0,89 \pm	0,83 \pm	0,81 \pm	0,72 \pm	0,84 \pm	0,78 \pm
		0,05	0,01	0,02	0,02 ^a	0,03 ^a	0,03 ^a
%	K	2,40 \pm	2,40 \pm	2,22 \pm	2,95 \pm	2,63 \pm	2,78 \pm
		0,39	0,23	0,26	0,36 ^a	0,13 ^a	0,27 ^a
Ca		1,15 \pm	1,06 \pm	1,03 \pm	1,23 \pm	1,27 \pm	1,31 \pm
		0,07	0,01	0,03	0,13 ^a	0,03 ^a	0,08 ^a
Mg		0,84 \pm	0,79 \pm	0,78 \pm	0,76 \pm	0,90 \pm	0,81 \pm
		0,11	0,03	0,04	0,07 ^a	0,07 ^a	0,08 ^a
Fe		62,40 \pm	61,26 \pm	57,51 \pm	72,54 \pm	79,17 \pm	86,13 \pm
		3,54	2,44	2,62	5,44 ^a	2,23 ^a	1,36 ^a
ppm	Zn	17,45 \pm	20,42 \pm	16,41 \pm	26,64 \pm	24,31 \pm	26,13 \pm
		1,21	1,97	0,57	0,50 ^a	1,29 ^a	1,10 ^a
Mn		16,33 \pm	15,49 \pm	17,48 \pm	23,69 \pm	27,33 \pm	36,00 \pm
		0,36	0,29	2,00	1,41 ^b	1,45 ^{ab}	5,53 ^a
Cu		7,96 \pm	7,23 \pm	7,32 \pm	11,24 \pm	10,90 \pm	10,95 \pm
		0,64	0,28	0,37	0,51 ^a	0,45 ^a	1,42 ^a
mg g ⁻¹	Na	1,87 \pm	1,80 \pm	1,84 \pm	5,85 \pm	7,18 \pm	6,33 \pm
		0,23	0,21	0,21	0,77 ^a	0,02 ^a	0,92 ^a

Οι αναλύσεις ολικών φαινολικών έδειξαν όμοιες συγκεντρώσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων για τα όλα χρονικά σημεία που μελετήθηκαν (Γράφημα 29, α). Οι υψηλότερες τιμές για τα ολικά φαινολικά καταγράφηκαν στα νεαρά φυτά (ημέρες 10 και 35), ενώ μειώθηκαν σε πιο ώριμα φυτά, κατά τις ημέρες 22 και 45 που έγιναν και οι δύο κοπές. Η ικανότητα αποδόμησης του DPPH, εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος, ήταν

σημαντικά υψηλότερη την ημέρα 10 του πειράματος στην ομάδα FF2 σε σύγκριση με την ομάδα FF5, όμως η μεταχείριση FF3 δεν διέφερε σημαντικά από τις άλλες δύο (Γράφημα 29, β). Από εκείνο το χρονικό σημείο και έπειτα οι τιμές ασκορβικού οξέος παρέμειναν χαμηλότερες και σταθερές στην πορεία του χρόνου και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.



Γράφημα 29. Αντιοξειδωτική ικανότητα των φύλλων μέντας κατά την πειραματική περίοδο. (α) ολικά φαινολικά εκφρασμένα ως ισοδύναμα γαλλικού οξέος σε αναγωγή ξηρού ιστού και (β) DPPH εκφρασμένη ως ισοδύναμα ασκορβικού οξέος σε αναγωγή νωπού ιστού (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 6$). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων σε κάθε πειραματική ημέρα και η απουσία γραμμάτων μη σημαντικές διαφορές ($p \leq 0,05$).

Η ποσότητα και ποιότητα των αιθέριων ελαίων στην μέντα δεν επηρεάστηκε ιδιαίτερα από τις διαφορετικές συχνότητες σίτισης που εφαρμόστηκαν για την εκτροφή της κόκκινης τιλάπιας. Η απόδοση του αιθέριου ελαίου ήταν $18,85 \pm 2,34$, $18,32 \pm 1,34$ και $19,09 \pm 1,17$ ml kg^{-1} ξηρού βάρους για τις ομάδες FF2, FF3 και FF5 αντίστοιχα, χωρίς την ύπαρξη σημαντικών διαφορών μεταξύ των ομάδων. Η σύσταση των αιθέριων ελαίων έδειξε την ύπαρξη 47 ουσιών σε όλα τα δείγματα. Οι ουσίες που ανιχνεύτηκαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ήταν οι εξής: D-menthone, Pulegone, Isomenthone, D-Germacrene, και Menthol, για τις οποίες δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων. Η FF5 αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα των ουσιών Terpinolene και Terpinen-4-ol της μέντας, την 2^η ουσία κατά 54% και 43% σε σχέση με τις FF2 και FF3. Δεν υπήρξαν άλλες σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων ως προς την ποιότητα των αιθέριων ελαίων.

Πίνακας 26. Απόδοση και σύσταση αιθέριου ελαίου μέντας (% αιθέριου ελαίου) και οι χρόνοι εμφάνισης τους στο χρωματογράφημα (Μέσοι όροι \pm SEM, $n = 3$). Διαφορετικά γράμματα δηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων ($p \leq 0,05$).

		FF2	FF3	FF5
Απόδοση (ml kg ⁻¹ ξηρού βάρους)		18,85 \pm 2,34 ^a	18,32 \pm 1,34 ^a	19,09 \pm 1,17 ^a
Χρόνος	Ουσίες (%)			
6,72	α -Thujene	0,04 \pm 0,003 ^a	0,04 \pm 0,003 ^a	0,05 \pm 0,003 ^a
6,94	d- α -Pinene	0,42 \pm 0,015 ^a	0,43 \pm 0,049 ^a	0,49 \pm 0,023 ^a
7,43	Camphene	0,02 \pm 0,003 ^a	0,02 \pm 0,003 ^a	0,02 \pm 0,003 ^a
7,55	Dehydrosabinene	0,01 \pm 0,003 ^a	0,01 \pm 0,003 ^a	0,01 \pm 0,003 ^a
8,11	Sabinene	0,31 \pm 0,015 ^a	0,30 \pm 0,045 ^a	0,36 \pm 0,032 ^a
8,25	β -Pinene	0,60 \pm 0,021 ^a	0,61 \pm 0,061 ^a	0,67 \pm 0,029 ^a
8,60	β -Myrcene	0,22 \pm 0,021 ^a	0,22 \pm 0,032 ^a	0,24 \pm 0,012 ^a
9,00	Pseudolimonen	0,03 \pm 0,003 ^a	0,03 \pm 0,003 ^a	0,03 \pm 0,003 ^a
9,37	a-Terpinene	0,08 \pm 0,010 ^a	0,10 \pm 0,007 ^a	0,12 \pm 0,012 ^a
9,58	o-Cymene	0,20 \pm 0,047 ^a	0,17 \pm 0,009 ^a	0,25 \pm 0,022 ^a
9,70	D-Limonene	1,87 \pm 0,194 ^a	1,56 \pm 0,179 ^a	1,83 \pm 0,042 ^a
9,78	Eucalyptol	2,48 \pm 0,128 ^a	2,53 \pm 0,326 ^a	2,97 \pm 0,276 ^a
9,90	d- α -Pinene	0,15 \pm 0,030 ^a	0,16 \pm 0,040 ^a	0,20 \pm 0,009 ^a
10,49	γ -Terpinene	0,19 \pm 0,025 ^a	0,19 \pm 0,019 ^a	0,23 \pm 0,017 ^a
10,80	cis- β -Terpineol	3,51 \pm 0,184 ^a	3,15 \pm 0,193 ^a	3,69 \pm 0,320 ^a
11,20	Terpinolene	0,09 \pm 0,006 ^b	0,10 \pm 0,003 ^b	0,12 \pm 0,003 ^a
11,61	cis- β -Terpineol	0,23 \pm 0,020 ^a	0,21 \pm 0,022 ^a	0,28 \pm 0,020 ^a
12,20	cis-p-Menth-2-en-1-ol	0,07 \pm 0,012 ^a	0,07 \pm 0,003 ^a	0,08 \pm 0,003 ^a
12,60	(E)-3(10)-Caren-4-ol	0,26 \pm 0,032 ^a	0,25 \pm 0,022 ^a	0,30 \pm 0,012 ^a
12,73	cis-Verbenol	0,16 \pm 0,013 ^a	0,12 \pm 0,027 ^a	0,18 \pm 0,007 ^a
12,97	D-menthone	45,02 \pm 1,465 ^a	46,64 \pm 1,197 ^a	43,68 \pm 0,555 ^a
13,13	Menthofurane	3,35 \pm 0,368 ^a	3,40 \pm 0,257 ^a	2,65 \pm 0,344 ^a
13,16	Isomenthone	6,57 \pm 0,280 ^a	6,29 \pm 0,685 ^a	7,71 \pm 0,301 ^a
13,27	Isomenthol	0,72 \pm 0,070 ^a	0,74 \pm 0,021 ^a	0,77 \pm 0,007 ^a
13,37	Isopulegone	1,73 \pm 0,262 ^a	1,57 \pm 0,085 ^a	1,63 \pm 0,033 ^a
13,44	Menthol	3,56 \pm 0,079 ^a	3,37 \pm 0,335 ^a	3,81 \pm 0,219 ^a
13,51	Terpinen-4-ol	0,68 \pm 0,092 ^b	0,73 \pm 0,044 ^b	1,05 \pm 0,058 ^a
13,86	Myrtenal	0,25 \pm 0,052 ^a	0,19 \pm 0,017 ^a	0,25 \pm 0,044 ^a
14,30	3,7-Undecanedione, 6,6,10-trimethyl-	0,11 \pm 0,009 ^a	0,10 \pm 0,012 ^a	0,13 \pm 0,007 ^a
14,69	Pentanoic acid, 3-hexenyl ester	0,23 \pm 0,015 ^a	0,19 \pm 0,012 ^a	0,22 \pm 0,007 ^a
14,79	Pulegone	14,34 \pm 1,162 ^a	14,28 \pm 1,122 ^a	13,54 \pm 0,816 ^a
15,15	Piperitone	1,47 \pm 0,111 ^a	1,35 \pm 0,020 ^a	1,62 \pm 0,068 ^a
15,86	Menthol, acetate	1,58 \pm 0,331 ^a	1,67 \pm 0,217 ^a	1,99 \pm 0,180 ^a
15,99	Dihydroedulan II	0,16 \pm 0,012 ^a	0,15 \pm 0,012 ^a	0,16 \pm 0,021 ^a
17,64	alfa.-Copaene	0,09 \pm 0,003 ^a	0,08 \pm 0,006 ^a	0,09 \pm 0,006 ^a
17,89	β -Elemene	0,69 \pm 0,032 ^a	0,68 \pm 0,054 ^a	0,66 \pm 0,035 ^a
18,50	β -Caryophyllene	1,44 \pm 0,039 ^a	1,37 \pm 0,121 ^a	1,38 \pm 0,046 ^a
19,07	(E)- β -Famesene	0,21 \pm 0,015 ^a	0,18 \pm 0,046 ^a	0,22 \pm 0,023 ^a
19,16	Humulene	0,16 \pm 0,006 ^a	0,18 \pm 0,012 ^a	0,16 \pm 0,012 ^a
19,27	epi-Bicyclosesquiphellandrene	0,23 \pm 0,009 ^a	0,24 \pm 0,023 ^a	0,25 \pm 0,015 ^a
19,63	D-Germacrene	4,55 \pm 0,377 ^a	4,50 \pm 0,325 ^a	4,21 \pm 0,192 ^a
19,88	γ -Elemene	0,76 \pm 0,067 ^a	0,67 \pm 0,034 ^a	0,62 \pm 0,060 ^a
21,34	Spathulenol	0,15 \pm 0,012 ^a	0,14 \pm 0,010 ^a	0,14 \pm 0,003 ^a
21,44	Caryophyllene oxide	0,16 \pm 0,017 ^a	0,17 \pm 0,009 ^a	0,16 \pm 0,012 ^a
21,65	Viridiflorol	0,73 \pm 0,047 ^a	0,72 \pm 0,046 ^a	0,68 \pm 0,010 ^a
21,98	Cubenol	0,06 \pm 0,009 ^a	0,07 \pm 0,006 ^a	0,05 \pm 0,003 ^a
22,68	α -Cadinol	0,06 \pm 0,006 ^a	0,06 \pm 0,003 ^a	0,05 \pm 0,007 ^a

4. Συζήτηση

Οι διαφορετικές συχνότητες σίτισης της τιλάπιας δεν επηρέασαν τις φυσικοχημικές παραμέτρους του νερού. Η μοναδική στατιστικώς σημαντική διαφορά, η οποία όμως ήταν της τάξης του 1% και δεν αξιολογείται ως καθοριστική, αφορούσε το DO που ήταν μικρότερο στα FF3 και FF5 συγκριτικά με το FF2. Η συγκέντρωση του οξυγόνου στο θρεπτικό διάλυμα για την καλλιέργεια της μέντας (*Mentha spicata*) θα πρέπει να κυμαίνεται από 7,1 – 8,6 mg L⁻¹ (Knaus et al., 2022; Nozzi et al., 2018), συνθήκη που διατηρήθηκε και στην παρούσα εργασία με DO μεταξύ 8,16 – 8,23 mg L⁻¹. Τα θρεπτικά συστατικά στο νερό των συστημάτων έδειξαν όμοιες τιμές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν στην εργασία των Mabroke et al., (2021) για την τιλάπια σε συστήματα RAS υψηλής ιχθυοπυκνότητας για συχνότητες σίτισης μία έως πέντε φορές την ημέρα. Αντίθετα, στην εργασία των (Liang & Chien, 2013) η εκτροφή της τιλάπιας σε ενυδρειοπονία με δύο γεύματα την ημέρα ανά 12 ώρες αύξησε το ολικό άζωτο και τη συγκέντρωση των νιτρικών στο θρεπτικό διάλυμα συγκριτικά με τις τέσσερις και έξι φορές σίτιση των ψαριών στην διάρκεια της ημέρας. Στο παρόν πείραμα, η συγκέντρωση των νιτρικών στο θρεπτικό διάλυμα ήταν κοντά στα 100 mg L⁻¹ ενώ στην εργασία των Knaus et al., (2022) σε συγκαλλιέργεια μέντας (*Mentha spicata*) με αφρικανικό γατόψαρο (*Clarias gariepinus*) τα νιτρικά κυμάνθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα (178 – 191 mg L⁻¹) χωρίς όμως να επηρεάζονται από την εκτεταμένη ή εντατική εκτροφή των ψαριών. Στα ενυδρειοπονικά συστήματα, οι συγκεντρώσεις καλίου και σιδήρου στο νερό αποτελούν έναν μόνιμο περιοριστικό παράγοντα καθώς βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, επομένως δεν καλύπτουν τις ανάγκες των φυτών. Η συγκέντρωση καλίου στο θρεπτικό διάλυμα της παρούσας εργασίας ήταν σχεδόν μηδενική, επομένως χορηγήθηκε το κάλιο διαφυλλικά για την αποφυγή τροφοπενίας, ενώ αντίστοιχα προστέθηκε και σίδηρος. Η εξασφάλιση επαρκών συγκεντρώσεων των δύο αυτών θρεπτικών με εξωγενείς προσθήκες καταγράφεται στα μειονεκτήματα της ενυδρειοπονίας. Εντούτοις, αποτελεί μία συνήθη πρακτική που εξασφαλίζει την αποδοτικότητα του συστήματος, επιτρέποντας την αξιοποίηση όλων των άλλων πλεονεκτημάτων του σε σχέση με τον αειφόρο χαρακτήρα και την κυκλικότητα στη χρήση των εισροών (Roosta, 2014b).

Η ανάπτυξη των ψαριών, όπως αποτυπώθηκε στο μέσο βάρος και μήκος τους, αλλά και στη συνολική παραγωγή σε kg m⁻³ παρέμεινε ανεπηρέαστη από τις διαφορετικές συχνότητες σίτισης. Η παραγωγή μέχρι την 1^η κοπή του πειράματος κυμάνθηκε από 3,82 – 4,01 kg m⁻³ και στην τελική συγκομιδή η παραγωγή έφτασε τα 6,45 – 8,11 kg m⁻³. Επιπλέον, οι διαφορετικές συχνότητες σίτισης δεν επηρέασαν τον δείκτη WG που σε διάρκεια 45 ημερών

έφτασε τα 25,12 – 26,80 g. Σύμφωνα με την εργασία των El-Araby et al., (2020) καταγράφηκε παρόμοια τιμή WG (29,93 g) για νεαρά άτομα τιλάπιας με καθημερινή σίτιση με δύο γεύματα την ημέρα μέχρι κορεσμό, ενώ η εργασία των Hisano et al., (2021) έδειξε ότι τα τέσσερα γεύματα την ημέρα (ανά 3 ώρες) αύξησαν σημαντικά το WG κατά 17% σε σύγκριση με τα έξι γεύματα την ημέρα (ανά 2 ώρες σίτιση). Ο ρυθμός αύξησης της τιλάπιας ήταν υψηλός σε όλες τις μεταχειρίσεις και στο τέλος του πειράματος οι τιμές SGR ήταν 4,2 – 4,4 % day⁻¹. Στην έρευνα των Thongprajukaew et al., (2017) η υψηλότερη τιμή SGR καταγράφηκε στην σίτιση της τιλάπιας μέχρι κορεσμό με δύο γεύματα την ημέρα (ανά 12 ώρες) (3,65 % day⁻¹) και δεν διέφερε από τον ρυθμό αύξησης που επιτεύχθηκε με τρία γεύματα την ημέρα (ανά 6 ώρες) (3,60 % day⁻¹). Γενικότερα, η καθημερινή σίτιση της τιλάπιας με δύο γεύματα την ημέρα βελτιώνει την ανάπτυξη της, αλλά και η σίτιση ανά δύο ή τρεις ημέρες παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα (El-Araby et al., 2020). Η τιλάπια σε κατάσταση προσωρινής ασιτίας μπορεί να ρυθμίσει το βάρος της μέσω της αντισταθμιστικής ανάπτυξης, όμως στην ενυδρείοποιία αυτή η εφαρμογή ασιτίας για κάποια/ες ημέρα/ες θα μπορούσε να έχει αντίκτυπο στην καλλιέργεια των φυτών, επηρεάζοντας τα θρεπτικά συστατικά του νερού. Η σίτιση μέχρι κορεσμό έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς μειώνονται τα υπολείμματα τροφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της σπατάλης τροφής αλλά και των προβλημάτων που προκαλεί η παραμονή της στο σύστημα, για παράδειγμα τη συσσώρευση στο φίλτρο, παραγωγή ιζηματολόσσης και μείωση διαθεσιμότητας θρεπτικών για τα φυτά (Delaide et al., 2019; Goddek et al., 2016). Στην παρούσα έρευνα η μέτρηση κατανάλωσης τροφής έδειξε ότι μόνο διαλυτοποιημένη τροφή σε ποσότητα 0,04 g/μεταχείριση/ημέρα παρέμεινε στο σύστημα, άρα η τροφή που δεν καταναλώθηκε ήταν ελάχιστη. Τα ποσοστά επιβίωσης αν και διατηρήθηκαν σε υψηλά επίπεδα παρατηρήθηκαν θνησιμότητες στα ψάρια οι οποίες οφείλονται στην προσπάθεια των ψαριών να αναπαραχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος λόγω των ιδανικών συνθηκών που επικράτησαν κατά την εκτροφή. Αυτό επιβεβαιώθηκε από την παρουσία αυγών που βρέθηκαν στα ενυδρεία κατά τη διάρκεια της εκτροφής, και κατά την ανατομία των ψαριών για την εξαγωγή μυϊκού ιστού στο τέλος του πειράματος, όπου φάνηκε ότι τα ψάρια ήταν αναπαραγωγικά ώριμα. Στην παρούσα μελέτη η FF5 οδήγησε σε σημαντικά μειωμένη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη στην σάρκα των ψαριών. Αντίθετα ήταν τα αποτελέσματα των Daudpota et al., (2016), όπου η αύξηση της συχνότητας σίτισης από 4 σε 5 φορές αύξησε την ανάπτυξη των ψαριών και την περιεκτικότητα σε λίπος αλλά δεν επηρέασε την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη.

Η ανάπτυξη των φυτών μέντας δεν εμφάνισε διαφορές σε καμία παράμετρο από την εφαρμογή διαφορετικών συχνοτήτων σίτισης των ψαριών ενώ καταγράφηκε και αυξημένη

παραγωγή σε σχέση με άλλες έρευνες. Ενδεικτικό είναι ότι στην 2^η κοπή επιτεύχθηκε παραγωγή νωπής βιομάζας της τάξης των 1,8-1,95 kg m⁻² και συνολικά στις δύο κοπές σχεδόν 3 kg m⁻² ανεξαρτήτως μεταχείρισης. Οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα 4 και 6,5 φορές μεγαλύτερες από την παραγωγή μέντας (*Mentha × piperita*) που αναφέρεται από τους Ogah et al., (2020) σε παρόμοιο ενυδραιοπονικό σύστημα, η οποία έφτασε μόλις τα 475,82 ± 18,33 g m⁻². Σε άλλο πείραμα, η ανάπτυξη της μέντας ως προς το νωπό βάρος, το ύψος και των αριθμό φύλλων δεν επηρεάστηκε από τις διαφορετικές ιχθυοπυκνότητες κόκκινης τιλάπιας όταν κυμαίνονται από 1,8 έως 2,7 kg m⁻³ (Khodary et al., 2023). Επιπρόσθετα, η εκτροφή του αφρικανικού γατόψαρου σε εντατική ιχθυοπυκνότητα 30,6 kg m⁻³ αύξησε σημαντικά την παραγωγή μέντας (*Mentha spicata*) κατά 1,6 φορές σε σχέση με την ιχθυοπυκνότητα των 7,6 kg m⁻³ (Knaus et al., 2020). Σε πειράματα υδροπονικής καλλιέργειας μέντας αποδείχτηκε ότι το υπόστρωμα που επιλέγεται καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα παραγωγής. Η μελέτη των Nguyen et al., (2023) για την *Mentha arvensis* έδειξε αύξηση της παραγωγής όταν τα φυτά καλλιεργήθηκαν με την τεχνική υποστρώματος αργίλου σε σχέση με την καλλιέργεια σε πλωτά συστήματα κατά την πρώτη κοπή των φυτών, όμως στην δεύτερη κοπή είχαν παρόμοια παραγωγή. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Shete et al., (2017) όπου η ανάπτυξη των φυτών μέντας σε πλωτά συστήματα υστερούσε σε σχέση με την ανάπτυξη της μέντας σε υπόστρωμα με θρυμματισμένες πέτρες. Αυτές οι διαφορές πιθανόν οφείλονται στον καλύτερο αερισμό του ριζικού συστήματος που παρέχει η τεχνική των υποστρωμάτων συγκριτικά με την πλωτή καλλιέργεια (Maucieri et al., 2019). Αντίθετα, η έρευνα των Knaus et al., (2022) για την *Mentha spicata* έδειξε μεγαλύτερη ανάπτυξη υπέργειου σε συνθήκες πλωτής καλλιέργειας και NFT σε σύγκριση με την καλλιέργεια σε υπόστρωμα χαλικιού.

Οι λειτουργικές παράμετροι της μέντας που καταγράφηκαν στην παρούσα εργασία είχαν παρόμοια απόδοση ανεξαρτήτως της συχνότητας σίτισης των ψαριών και αυτό αποτυπώθηκε στην παρόμοια ανάπτυξη των φυτών που περιγράφηκε προηγουμένως. Τόσο η διακύμανση των ανταλλαγών αερίων, όσο και η απόδοση της φωτοχημείας του PSII, όπως καταγράφηκε από το φθορισμό, αλλά και η συγκέντρωση χλωροφυλλών και η LUE, όπως αποτυπώθηκε από το PRI, δεν εμφάνισαν διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων, παρότι μία επίδραση της αναπτυξιακής ωριμότητας του φυτού ήταν εμφανής. Σε όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους τα πολύ νεαρά φύλλα εμφάνισαν χαμηλότερα επίπεδα που αυξάνονταν καθώς τα φύλλα προχωρούσαν προς την ωρίμανσή τους. Αυτό το πρότυπο επαναλήφθηκε πανομοιότυπο στις δύο φάσεις του πειράματος, που έληξαν με την 1^η και την 2^η κοπή αντίστοιχα. Η επίδραση του αναπτυξιακού σταδίου στις φυσιολογικές παραμέτρους πριν και μετά τις κοπές φάνηκε και στο βασιλικό του προηγούμενου κεφαλαίου. Αντίστοιχα

πειράματα δεν υπάρχουν προς σύγκριση στην σχετική με την ενυδραιοπονία έρευνα. Φυτά μέντας έχουν εξεταστεί ως προς τις λειτουργικές τους αποκρίσεις μόνο σε σχέση με πλωτά συστήματα στην ενυδραιοπονία συγκριτικά με υπόστρωμα περλίτη, όπου φάνηκε ότι στα πρώτα υπήρξαν μειώσεις σε A_n , g_s και E , καθώς και στα επίπεδα των χλωροφυλλών (Roosta & Sajjadinia, 2010). Σε άλλο ενυδραιοπονικό πείραμα με μέντα εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης Fe και K σε φυσιολογικές παραμέτρους (Roosta, 2014b). Οι προσθήκες αύξησαν σημαντικά την ολική χλωροφύλλη αλλά και τους δείκτες που σχετίζονται με το PSII όπως τα F_v/F_m και PI.

Η μέντα εμφανίζει γρήγορη προσαρμογή και αυξημένη ανάπτυξη στην ενυδραιοπονία σε σχέση με άλλα είδη, που οφείλεται στην μεγαλύτερη απορρόφηση θρεπτικών συστατικών. Σε συγκριτικό πείραμα ανάπτυξης αρωματικών φυτών στην ενυδραιοπονία καταγράφηκε μεγαλύτερη απορρόφηση N και K στη μέντα συγκριτικά με το κόλιανδρο ή το σέλερι, αντίθετα δεν καταγράφηκαν διαφορές μεταξύ των ειδών για τον φώσφορο (Ogah et al., 2020). Η σύσταση της τροφής έχει αντίκτυπο και στη σύσταση των θρεπτικών συστατικών που απελευθερώνονται μέσω των κοπράνων (Eck et al., 2019). Μία αύξηση στη συχνότητα σίτισης οδηγεί σε αύξηση της συνολικής παρεχόμενης ποσότητας τροφής και στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται ορισμένα θρεπτικά συστατικά από τα ψάρια, αυξάνεται η διαθεσιμότητά τους για τα φυτά (Stathoroulou et al., 2021). Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε κάτι ανάλογο με την αυξημένη συγκέντρωση Mn στα φυτά FF5 ακολουθούμενη από τα FF3 και FF2. Παράλληλα, έχει αναφερθεί ότι ο διαφυλλικός ψεκασμός της μέντας με κάλιο ενισχύει την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών με αποτέλεσμα να καταγράφεται αύξηση όχι μόνο στην περιεκτικότητα K αλλά και στην περιεκτικότητα Zn, ενώ τα Ca, Mg, Na, Fe και Mn δεν επηρεάζονται (Roosta, 2014b). Στο παρόν πείραμα η διαφυλλική χορήγηση καλίου εφαρμόστηκε σε όλες τις ομάδες και γι' αυτό τον λόγο δεν καταγράφηκαν άλλες διαφορές στα θρεπτικά συστατικά στο υπέργειο τμήμα της μέντας.

Το αντιοξειδωτικό δυναμικό των φυτών μέντας παρέμεινε σε παρόμοια επίπεδα σε όλες τις μεταχειρίσεις, υποδεικνύοντας ότι καμία από αυτές δεν αποτέλεσε καταπονητική συνθήκη για τη λειτουργία του φυτού. Φαίνεται ότι η μέντα έχει ήδη υψηλές συγκεντρώσεις ολικών φαινολικών, εντούτοις αύξησή τους θα σχετιζόταν με κάποια καταπόνηση. Όπως είναι γνωστό, όταν τα φυτά εκτίθενται σε συνθήκες καταπόνησης συσσωρεύονται ROS τα αυξημένα επίπεδα των οποίων μπορούν να οδηγήσουν σε φυσιολογικές και δομικές βλάβες (Καραμπουρνιώτης et al., 2012). Στις καταστάσεις αυτές ενεργοποιούνται ενζυμικοί και μη ενζυμικοί αντιοξειδωτικοί μηχανισμοί, αποτρέποντας έτσι τυχόν δυσμενείς συνέπειες στη φυσιολογία και την ανάπτυξη του φυτού (Garg & Manchanda, 2009). Στην έρευνα των Kasampalis et al.,

(2021) που αφορούσε τις επιδράσεις αυξημένης αλατότητας σε μέντα δεν καταγράφηκαν αλλαγές στη συγκέντρωση ασκορβικού οξέος (298 – 366 mg AAEC 100 g⁻¹ FW) και ολικών φαινολικών (1,10 – 1,31 mg GAE Kg⁻¹ FW). Αυτές οι συγκεντρώσεις είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές που βρέθηκαν στην παρούσα εργασία αλλά ακόμη μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στην εργασία των Albayrak et al., (2013) (240 mg AAEC g⁻¹ και 90 mg GAE g⁻¹) που όμως αφορούσαν *in vitro* καλλιέργεια μέντας. Σε υδροπονική καλλιέργεια της *Mentha arvensis*, η έλλειψη Κ στο θρεπτικό διάλυμα αυξάνει σημαντικά την συγκέντρωση ολικών φαινολικών και την ικανότητα αποδόμησης του DPPH στην μέντα, ενώ η έλλειψη Μn τη συγκέντρωση των φλαβονοειδών (Janpen et al., 2019).

Η απόδοση των φυτών μέντας σε αιθέριο έλαιο ήταν 1,8 ml 100 g⁻¹ ανεξαρτήτως μεταχειρίσεων στη συχνότητα σίτισης των ψαριών. Αυτή η ποσότητα ήταν αυξημένη σε σχέση με την καλλιέργεια *Mentha piperita* που αναφέρουν οι Ram et al., (2012), η απόδοση της οποίας ήταν 0,55 ml 100 g⁻¹. Σε συγκριτικό πείραμα των Roosta & Ghorbani, (2011), η *Mentha piperita* είχε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο στην ενυδρειοπονία σε σχέση με την υδροπονία, ενώ για την *Mentha sativa* παρατηρήθηκε ακριβώς το αντίθετο. Γενικότερα, τα αιθέρια έλαια των φυτών αποτελούνται από τερπενοειδή και φενυλπροπανοειδή όπως είναι τα μονοτερπένια που βρίσκονται σε αφθονία (Sangwan et al., 2001). Συνήθως στην μέντα τα μονοτερπένια αποτελούν το 90 % του αιθέριου ελαίου και η μενθόλη αντιπροσωπεύει το 70 – 90 % των μονοτερπενίων (Souza et al., 2014). Αλλαγές στη σύσταση των αιθερίων ελαίων κατέγραψε η εργασία των Karamanoli et al., (2018) μετά από 60 ημέρες ενσωμάτωσης των φύλλων μέντας στο έδαφος, με μείωση των μονοτερπενίων από 90% σε 20%. Στην μέντα που καλλιεργήθηκε στην παρούσα εργασία βρέθηκαν 47 ουσίες και αυτές που ήταν σε μεγαλύτερο ποσοστό ήταν οι D-menthone (43,7 – 46,6 %), Pulegone (13,5 – 14,3 %), Isomenthone (6,3 – 7,7 %), D-Germacrene (4,2 – 4,6 %), και Menthol (3,4 – 3,8 %) χωρίς να εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Πολύ λιγότερες ουσίες βρέθηκαν στην *M. arvensis* (22 ουσίες) και η σύσταση του ελαίου αποτελούνταν από Menthol (60,8 – 68,2 %), D-menthone (13,2 – 17,3 %), menthone (6,5 – 7,1 %), limonene (6,1 – 7,1 %) and p-menth-2-ene (3,0 – 3,4 %) (Smitha & Rana, 2015).

5. Συμπεράσματα

Η καλλιέργεια της μέντας στην ενυδρειοπονία είναι ιδιαίτερα αποδοτική λόγω της γρήγορης προσαρμογής και ανάπτυξης των φυτών και της δυνατότητας διαδοχικών κοπών που μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή βιομάζας και αιθέριου ελαίου. Θεωρητικά οι

διαφορετικές συχνότητες σίτισης των ψαριών μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη τους και να επιβραδύνουν ή να ενισχύσουν την παραγωγικότητα του συστήματος στην ενυδραιοπονία. Εντούτοις, στο παρόν πείραμα, η αύξηση των γευμάτων στην διάρκεια της ημέρας έως πέντε φορές δεν επηρέασε τις αναπτυξιακές και λειτουργικές αποκρίσεις των φυτών μέντας αλλά και την ανάπτυξη των ψαριών. Οι μόνες διαφορές που καταγράφηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν ότι η FF5 προκάλεσε αύξηση του Mn στο υπέργειο μέρος των φυτών και αύξησε μόνο δύο ουσίες στα αιθέρια έλαια της μέντας. Η συνολική εικόνα των παραμέτρων φυτών και ψαριών που καταγράφηκαν είναι ότι οι FF2 και FF3 μεταχειρίσεις ήταν εξίσου επαρκείς για την υψηλή απόδοση του όλου ενυδραιοπονικού συστήματος. Συμπερασματικά τα δύο ημερήσια γεύματα ημέρα, ανά 6 ώρες, είναι κατάλληλη και αποτελεσματική συχνότητα σίτισης της κόκκινης τιλάπιας για την παράλληλη καλλιέργεια μέντας στην ενυδραιοπονία που εξασφαλίζει εξοικονόμηση τροφής και ταυτοχρόνως υψηλή παραγωγικότητα του συστήματος.

Βιβλιογραφία

- Adams, P., & Ho, L. C. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant and Soil*, *154*(1), 127–132. <https://doi.org/10.1007/BF00011081>
- Albadwawi, M. A. O. K., Ahmed, Z. F. R., Kurup, S. S., Alyafei, M. A., & Jaleel, A. (2022). A Comparative Evaluation of Aquaponic and Soil Systems on Yield and Antioxidant Levels in Basil, an Important Food Plant in Lamiaceae. *Agronomy*, *12*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123007>
- Albayrak, S., Aksoy, A., Albayrak, S., & Sagdic, O. (2013). In vitro antioxidant and antimicrobial activity of some Lamiaceae species. *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)*, *37*(1), 1–9.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (Eds.). (2012). *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.288998>
- Almiron, N., & Zoppeddu, M. (2015). Eating Meat and Climate Change: The Media Blind Spot—A Study of Spanish and Italian Press Coverage. *Environmental Communication*, *9*(3), 307–325. <https://doi.org/10.1080/17524032.2014.953968>
- Amin, M., Agustono, A., Ali, M., Prayugo, P., & Hum, N. N. M. F. (2023). Isolation and screening of indigenous nitrifying bacteria to enhance nutrient recovery in an aquaponics system. *Journal of the World Aquaculture Society*, *n/a*(n/a). <https://doi.org/10.1111/jwas.12970>
- Anderson, T. S., Martini, M. R., De Villiers, D., & Timmons, M. B. (2017). Growth and tissue elemental composition response of butterhead lettuce (*Lactuca sativa*, cv. Flandria) to hydroponic conditions at different pH and alkalinity. *Horticulturae*, *3*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3030041>
- Andriani, Y., Dhahiyat, Y., Zahidah, Z., & Zidni, I. (2017). The effect of stocking density ratio of fish on water plant productivity in aquaponics culture system. *Nusantara Bioscience*, *9*(1), Article 1. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n090106>
- Andriani, Y., Zahidah, Dhahiyat, Y., Subhan, U., Zidni, I., Pratama, R. I., & Gumay, N. P. (2018). The effectiveness of the use of filter on the tilapia growth performance, number of Nitrosomonas sp., and water quality in aquaponics systems. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, *17*(1), Article 1. <https://doi.org/10.19027/jai.17.1.1-8>

- Atique, F., Lindholm-Lehto, P., & Pirhonen, J. (2022). Is aquaponics beneficial in terms of fish and plant growth and water quality in comparison to separate recirculating aquaculture and hydroponic systems? *Water*, *14*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w14091447>
- Avdouli, D., Max, J. F. J., Katsoulas, N., & Levizou, E. (2021). Basil as secondary crop in cascade hydroponics: Exploring salinity tolerance limits in terms of growth, amino acid profile, and nutrient composition. *Horticulturae*, *7*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080203>
- Awad, E., & Austin, B. (2010). Use of lupin, *Lupinus perennis*, mango, *Mangifera indica*, and stinging nettle, *Urtica dioica*, as feed additives to prevent *Aeromonas hydrophila* infection in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Journal of Fish Diseases*, *33*(5), 413–420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2009.01133.x>
- Awad, E., & Awaad, A. (2017). Role of medicinal plants on growth performance and immune status in fish. *Fish & Shellfish Immunology*, *67*, 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.05.034>
- Azaza, M. S., Wassim, K., Mensi, F., Abdelmouleh, A., Brini, B., & Kraïem, M. M. (2009). Evaluation of faba beans (*Vicia faba* L. var. Minuta) as a replacement for soybean meal in practical diets of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, *287*(1), 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.007>
- Baganz, G. F. M., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., Staaks, G., Shaw, C., Lohrberg, F., & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, *14*(1), 252–264. <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Baiyin, B., Tagawa, K., & Gutierrez, J. (2020). Techno-Economic Feasibility Analysis of a Stand-Alone Photovoltaic System for Combined Aquaponics on Drylands. *Sustainability*, *12*(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/su12229556>
- Balafrej, H., Bogusz, D., Triqui, Z.-E. A., Guedira, A., Bendaou, N., Smouni, A., & Fahr, M. (2020). Zinc Hyperaccumulation in Plants: A Review. *Plants*, *9*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/plants9050562>
- Barbosa, A. S., Pereira, R. G., Rodrigues, L. A., de Matos Casaca, J., Valenti, W. C., & Fabregat, T. E. H. P. (2020). Economic analysis of family trout farming in Southern Brazil. *Aquaculture International*, *28*(5), 2111–2120. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00580-7>
- Barros, M. M., Lim, C., & Klesius, P. H. (2002). Effect of soybean meal replacement by cottonseed meal and iron supplementation on growth, immune response and resistance

- of Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*) to *Edwardsiella ictaluri* challenge. *Aquaculture*, 207(3), 263–279. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00740-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00740-2)
- Beckers, S. (2019). Aquaponics: A positive impact circular economy approach TO feeding cities. *Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions, Special Issue 20*, Article Special Issue 20.
- Bilen, S., Soydaş, E., & Bilen, A. M. (2014). Effects of methanolic extracts of nettle (*Urtica dioica*) on non-specific immune response of gold fish (*Carassius auratus*). *Alinteri Zirai Bilimler Dergisi*, 27, 24–29.
- Bilen, S., Ünal, S., & Güvensoy, H. (2016). Effects of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and nettle (*Urtica dioica*) methanolic extracts on immune responses and resistance to *Aeromonas hydrophila* in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 454, 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.12.010>
- Binaii, M., Ghiasi, M., Farabi, S. M. V., Pourgholam, R., Fazli, H., Safari, R., Alavi, S. E., Taghavi, M. J., & Bankehsaz, Z. (2014). Biochemical and hemato-immunological parameters in juvenile beluga (*Huso huso*) following the diet supplemented with nettle (*Urtica dioica*). *Fish & Shellfish Immunology*, 36(1), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2013.10.001>
- Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on Cucumber Growth and Nutrient Availability in a Decoupled Aquaponic System with Minimal Solids Removal. *Horticulturae*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6010010>
- Blidariu, F., Radulov, I., Lalescu, D., Drasovean, A., & Grozea, A. (2013). Evaluation of nitrate level in green lettuce conventional grown under natural conditions and aquaponic system. *Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies / Lucrari Stiintifice: Zootehnie Si Biotehnologii*, 46(1), 244–250.
- Borges, B. M. M. N., Flores, R. A., de Almeida, H. J., Moda, L. R., & Prado, R. de M. (2016). Macronutrient omission and the development and nutritional status of basil in nutritive solution. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11), 1627–1633. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187742>
- Boxman, S. E., Nystrom, M., Ergas, S. J., Main, K. L., & Trotz, M. A. (2018). Evaluation of water treatment capacity, nutrient cycling, and biomass production in a marine aquaponic system. *Ecological Engineering*, 120, 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.06.003>

- Bracino, A. A., Concepcion, R. S., Dadios, E. P., & Vicerra, R. R. P. (2020). Biofiltration for Recirculating Aquaponic Systems: A Review. *2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM51456.2020.9400136>
- Brandi, C. A. (2017). Sustainability Standards and Sustainable Development – Synergies and Trade-Offs of Transnational Governance. *Sustainable Development*, *25*(1), 25–34. <https://doi.org/10.1002/sd.1639>
- Briat, J.-F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science*, *20*(1), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Chapter 7 - Function of Nutrients: Micronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (pp. 191–248). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Bruinsma, J. (2003). *World agriculture: Towards 2015/2030: An FAO perspective*. Earthscan.
- Buzby, K. M., & Lin, L.-S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering*, *63*, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002>
- Buzby, K. M., Waterland, N. L., Semmens, K. J., & Lin, L.-S. (2016). Evaluating aquaponic crops in a freshwater flow-through fish culture system. *Aquaculture*, *460*, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.03.046>
- Cai, J., Leung, P., Luo, Y., Yuan, X., & Yuan, Y., Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Improving the performance of tilapia farming under climate variation: Perspective from bioeconomic modelling*.
- Campbell, D. A. (2017). An Update on the United Nations Millennium Development Goals. *Journal of Obstetric, Gynecologic & Neonatal Nursing*, *46*(3), e48–e55. <https://doi.org/10.1016/j.jogn.2016.11.010>
- Castillo-Castellanos, D., Zavala-Leal, I., Ruiz-Velazco, J. M. J., Radilla-García, A., Nieto-Navarro, J. T., Romero-Bañuelos, C. A., & González-Hernández, J. (2016). Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International*, *24*(2), 637–646. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9954-z>

- Celikkol Erbas, B., & Guven Solakoglu, E. (2017). In the Presence of Climate Change, the Use of Fertilizers and the Effect of Income on Agricultural Emissions. *Sustainability*, 9(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su9111989>
- Cerozi, B. da S., & Fitzsimmons, K. (2016). The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology*, 219, 778–781. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079>
- Chatzigianni, M., Aliferis, K. A., Ntatsi, G., & Savvas, D. (2020). Effect of N supply level and N source ratio on *Cichorium spinosum* L. metabolism. *Agronomy*, 10(7), 952. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070952>
- Chatzigianni, M., Ntatsi, G., Theodorou, M., Stamatakis, A., Livieratos, I., Roupheal, Y., & Savvas, D. (2019). Functional quality, mineral composition and biomass production in hydroponic spiny chicory (*Cichorium spinosum* L.) are modulated interactively by ecotype, salinity and nitrogen supply. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1040. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01040>
- Ciriello, M., Formisano, L., El-Nakhel, C., Kyriacou, M. C., Soteriou, G. A., Pizzolongo, F., Romano, R., De Pascale, S., & Roupheal, Y. (2021). Genotype and Successive Harvests Interaction Affects Phenolic Acids and Aroma Profile of Genovese Basil for Pesto Sauce Production. *Foods*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/foods10020278>
- Cocking, C., Walton, J., Kehoe, L., Cashman, K. D., & Flynn, A. (2020). The role of meat in the European diet: Current state of knowledge on dietary recommendations, intakes and contribution to energy and nutrient intakes and status. *Nutrition Research Reviews*, 33(2), 181–189. <https://doi.org/10.1017/S0954422419000295>
- Connor, R., Renata, A., Ortigara, C., Koncagül, E., Uhlenbrook, S., Lamizana-Diallo, B. M., Zadeh, S. M., Qadir, M., Kjellén, M., & Sjödin, J. (2017). *The United Nations world water development report 2017. In: Wastewater: The untapped resource, The United Nations world water development report. UNESCO. UNESCO Digital Library.* <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751>
- Cunniff, P. (1995). Association of official analytical chemists. *Official Methods of AOAC Analysis*.
- da Silva, M. A., de Alvarenga, É. R., Costa, F. F. B. da, Turra, E. M., Alves, G. F. de O., Manduca, L. G., de Sales, S. C. M., Leite, N. R., Bezerra, V. M., Moraes, S. G. da S., & Teixeira, E. de A. (2020). Feeding management strategies to optimize the use of suspended feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in bioflocs. *Aquaculture Research*, 51(2), 605–615. <https://doi.org/10.1111/are.14408>

- Danaher, J. J., Shultz, R. C., Rakocy, J. E., & Bailey, D. S. (2013). Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(3), 374–383. <https://doi.org/10.1111/jwas.12040>
- Daudpota, A. M., Abbas, G., Kalhoro, I. B., Shah, S. S. A., Kalhoro, H., Hafeez-ur-Rehman, M., & Ghaffar, A. (2016). Effect of feeding frequency on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) reared in low salinity water. *Pakistan Journal of Zoology*, 48(1), 171–177.
- Davidson, J., & Summerfelt, S. T. (2005). Solids removal from a coldwater recirculating system—Comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering*, 33(1), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.002>
- Dediu, L. (2012). Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with baster and lettuce. *African Journal of Biotechnology*, 11(9). <https://doi.org/10.5897/AJB11.2829>
- Delaide, B. (2017). *A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability*. [ULiège - Université de Liège]. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/216289>
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8(10), 467. <https://doi.org/10.3390/w8100467>
- Delaide, B., Goddek, S., Keesman, K. J., & Jijakli, M. H. M. (2018). A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics: Une méthodologie pour quantifier les performances de digestion aérobie et anaérobie des boues, pour le recyclage des nutriments en Aquaponie. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 22(2), 106–112.
- Delaide, B., Monsees, H., Gross, A., & Goddek, S. (2019). Aerobic and anaerobic treatments for aquaponic sludge reduction and mineralisation. In *Aquaponics food production systems*. Springer International Publishing.
- Deng, J., Mai, K., Chen, L., Mi, H., & Zhang, L. (2015). Effects of replacing soybean meal with rubber seed meal on growth, antioxidant capacity, non-specific immune response, and resistance to *Aeromonas hydrophila* in tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*).

- Fish & Shellfish Immunology*, 44(2), 436–444.
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.03.018>
- Dhouibi, R., Affes, H., Ben Salem, M., Hammami, S., Sahnoun, Z., Zeghal, K. M., & Ksouda, K. (2020). Screening of pharmacological uses of *Urtica dioica* and others benefits. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 150, 67–77.
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2019.05.008>
- Diver, S., & Rinehart, L. (2006). *Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture* (Attra).
- Düğenci, S. K., Arda, N., & Candan, A. (2003). Some medicinal plants as immunostimulant for fish. *Journal of Ethnopharmacology*, 88(1), 99–106. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00182-X](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00182-X)
- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient Cycling in Aquaponics Systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 231–246). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9
- El-Araby, D. A., Amer, S. A., & Khalil, A. A. (2020). Effect of different feeding regimes on the growth performance, antioxidant activity, and health of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 528, 735572.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735572>
- Elhindi, K., Al-Suhaibani, N. A., El-Din, A. F. S., Yakout, S. M., & Al-Amri, S. M. (2016). Effect of foliar-applied iron and zinc on growth rate and essential oil in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under saline conditions. *Progress in Nutrition*, 18(3), 288–298.
- Elumalai, S., Shaw, A., Pattillo, D., Currey, C., Rosentrater, K., & Xie, K. (2017). Influence of UV treatment on the food safety status of a model aquaponic system. *Water*, 9(1), 27.
<https://doi.org/10.3390/w9010027>
- Emadodin, I., Narita, D., & Bork, H. R. (2012). Soil degradation and agricultural sustainability: An overview from Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 14(5), 611–625.
<https://doi.org/10.1007/s10668-012-9351-y>
- Endut, A., Jusoh, A., & Ali, N. (2014). Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 52(4–6), 744–752. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826336>
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W. B., & Hassan, A. (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, 101(5), 1511–1517. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>

- Endut, A., Lananan, F., Abdul Hamid, S. H., Jusoh, A., & Wan Nik, W. N. (2016). Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 57(60), 29531–29540. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1184593>
- Evans, J. R., & Clarke, V. C. (2019). The nitrogen cost of photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 70(1), 7–15. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery366>
- Fanourakis, D., Paschalidis, K., Tsaniklidis, G., Tzanakakis, V. A., Biliaris, F., Samara, E., Liapaki, E., Jouini, M., Ipsilantis, I., Maloupa, E., Tsoktouridis, G., Matsi, T., & Krigas, N. (2022). Pilot Cultivation of the Local Endemic Cretan Marjoram *Origanum microphyllum* (Benth.) Vogel (Lamiaceae): Effect of Fertilizers on Growth and Herbal Quality Features. *Agronomy*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010094>
- FAO. (2014). *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Food and Agricultural Organization, Rome, Italy.
- FAO (Ed.). (2017). *Leveraging food systems for inclusive rural transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferrarezi, R. S., & Bailey, D. S. (2019). Basil Performance Evaluation in Aquaponics. *HortTechnology*, 29(1), 85–93. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03797-17>
- Filella, I., Porcar-Castell, A., Munné-Bosch, S., Bäck, J., Garbulsky, M. F., & Peñuelas, J. (2009). PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle. *International Journal of Remote Sensing*, 30(17), 4443–4455. <https://doi.org/10.1080/01431160802575661>
- Filep, R. M., Diaconescu, Ș., Costache, M., Stavrescu-Bedivan, M.-M., Bădulescu, L., & Nicolae, C. G. (2016). Pilot aquaponic growing system of carp (*Cyprinus carpio*) and Basil (*Ocimum basilicum*). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.062>
- Forchino, A. A., Lourguioui, H., Brigolin, D., & Pastres, R. (2017). Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquacultural Engineering*, 77, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.03.002>

- Garcia-Servin, M., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2021). Estimation of Nitrogen Status in Plants. In *Nitrate Handbook* (1st ed., pp. 163–181). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429326806-10>
- Garg, N., & Manchanda, G. (2009). ROS generation in plants: Boon or bane? *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 143(1), 81–96. <https://doi.org/10.1080/11263500802633626>
- Geisenhoff, L. O., Jordan, R. A., Santos, R. C., Oliveira, F. C. de, & Gomes, E. P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Engenharia Agrícola*, 36, 291–299. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p291-299/2016>
- Germano, R. P., Melito, S., Cacini, S., Carmassi, G., Leoni, F., Maggini, R., Montesano, F. F., Pardossi, A., & Massa, D. (2022). Sweet basil can be grown hydroponically at low phosphorus and high sodium chloride concentration: Effect on plant and nutrient solution management. *Scientia Horticulturae*, 304, 111324. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111324>
- Gigliona, J. (2015). *Implementation of a Biogas-system into Aquaponics: Determination of minimum size of aquaponics and costs per kWh of the produced energy*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-25280>
- Goda, A. M. A.-S., Essa, M. A., Hassaan, M. S., & Sharawy, Z. (2015). Bio economic features for aquaponic systems in Egypt. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 15(3), 525–532.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Espinal, C., Delaide, B., Jijakli, M., Schmautz, Z., Wuertz, S., & Keesman, K. (2016). Navigating towards Decoupled Aquaponic Systems: A System Dynamics Design Approach. *Water*, 8(7), 303. <https://doi.org/10.3390/w8070303>
- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled Aquaponics Systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 201–229). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8
- Goddek, S., Schmautz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K. J., Wuertz, S., & Junge, R. (2016). The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. *Agronomy*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy6020037>

- Gosh, K., & Chowdhury, S. (2019). *Review of aquaponics system: Searching for a technically feasible and economically profitable aquaponics system*. 19, 5–13.
- Goupy, P., Hugues, M., Boivin, P., & Amiot, M. J. (1999). Antioxidant composition and activity of barley (*Hordeum vulgare*) and malt extracts and of isolated phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(12), 1625–1634. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199909\)79:12<1625::AID-JSFA411>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199909)79:12<1625::AID-JSFA411>3.0.CO;2-8)
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, 4(2), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Gupta, S., Kumar, A., Gupta, A. K., Jnanasha, A. C., Talha, M., Srivastava, A., & Lal, R. K. (2023). Industrial mint crop revolution, new opportunities, and novel cultivation ambitions: A review. *Ecological Genetics and Genomics*, 27, 100174. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2023.100174>
- Hashimi, M. H., Abad, Q., & Shafiqi, S. G. (2023). A Review of Diagnostic techniques of visual symptoms of nutrients deficiencies in plant. *IJO - International Journal of Agriculture and Research (ISSN 2814-189X)*, 6(02), Article 02.
- Hayes, J. E., Allen, P., Brunton, N., O’Grady, M. N., & Kerry, J. P. (2011). Phenolic composition and in vitro antioxidant capacity of four commercial phytochemical products: Olive leaf extract (*Olea europaea* L.), lutein, sesamol and ellagic acid. *Food Chemistry*, 126(3), 948–955. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.092>
- Herrmann, H. A., Schwartz, J.-M., & Johnson, G. N. (2020). From empirical to theoretical models of light response curves—Linking photosynthetic and metabolic acclimation. *Photosynthesis Research*, 145(1), 5–14. <https://doi.org/10.1007/s11120-019-00681-2>
- Hirayama, K. (1974). Water control by filtration in closed culture systems. *Aquaculture*, 4, 369–385. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(74\)90066-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(74)90066-0)
- Hisano, H., Pinheiro, V. R., Losekann, M. E., & Moura e Silva, M. S. G. (2021). Effect of feeding frequency on water quality, growth, and hematological parameters of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* reared using biofloc technology. *Journal of Applied Aquaculture*, 33(2), 96–110. <https://doi.org/10.1080/10454438.2020.1715909>

- Hoevenaars, K., Junge, R., Bardocz, T., & Leskovec, M. (2018). EU policies: New opportunities for aquaponics. *Ecocycles*, 4(1), 10–15. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v4i1.87>
- Hopkins, G. W., & Huner, P. A. N. (2020). *Φυσιολογία Φυτών* (Broken Hill Publishers Ltd).
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)—A novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)*, 7(11), 833–842.
- Hussain, T., Verma, A. K., Tiwari, V. K., Prakash, C., Rathore, G., Shete, A. P., & Saharan, N. (2015). Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. Koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. *Aquaculture International*, 1(23), 369–384. <https://doi.org/10.1007/s10499-014-9821-3>
- Imelouane, B., Tahri, M., Elbastrioui, M., Aouinti, F., & Elbachiri, A. (2011). Mineral contents of some medicinal and aromatic plants growing in eastern Morocco. *J. Mater. Environ. Sci.*, 2(2), 104–111.
- Jakovljević, D., Stanković, M., Warchoń, M., & Skrzypek, E. (2022). Basil (*Ocimum* L.) cell and organ culture for the secondary metabolites production: A review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 149(1), 61–79. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02286-5>
- Jan, K. N., zarafshan, K., & Singh, S. (2017). Stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A reservoir of nutrition and bioactive components with great functional potential. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(2), 423–433. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9410-4>
- Janpen, C., Kanthawang, N., Inkham, C., Tsan, F. Y., & Sommano, S. R. (2019). Physiological responses of hydroponically-grown Japanese mint under nutrient deficiency. *PeerJ*, 7, e7751. <https://doi.org/10.7717/peerj.7751>
- Jardim, A. M. da R. F., Santos, H. R. B., Alves, H. K. M. N., Ferreira-Silva, S. L., Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, Souza, C. A. A. de, & Silva, T. G. F. da. (2021). Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.011>
- Jin, C.-W., Liu, Y., Mao, Q.-Q., Wang, Q., & Du, S.-T. (2013). Mild Fe-deficiency improves biomass production and quality of hydroponic-cultivated spinach plants (*Spinacia*

- oleracea* L.). *Food Chemistry*, 138(4), 2188–2194.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.025>
- John, V. C., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Chandrakant, M. H., Bharti, V. S., & Varghese, T. (2022). Optimization of potassium (K⁺) supplementation for growth enhancement of *Spinacia oleracea* L. and *Pangasianodon hypophthalmus* (Sauvage, 1878) in an aquaponic system. *Agricultural Water Management*, 261, 107339.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107339>
- Johnson, G. E., Buzby, K. M., Semmens, K. J., Holaskova, I., & Waterland, N. L. (2017). Evaluation of lettuce between spring water, hydroponic, and flow-through aquaponic systems. *International Journal of Vegetable Science*, 23(5), 456–470.
<https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1319888>
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B., & Wuertz, S. (2019). Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (pp. 19–34). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S., & Pentz, T. (2019). Bacterial relationships in aquaponics: New research directions. In *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 145–161). Springer Open.
- Juárez-Rosete, C. R., Olivo-Rivas, A., Aguilar-Castillo, J. A., Bugarín-Montoya, R., & Arrieta-Ramos, B. G. (2014). Nutrition Assessment of N-P-K in mint (*Mentha spicata* L.) cultivated in soilless system. *Annual Research & Review in Biology*, 2462–2470.
<https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/9379>
- Juszczuk, I. M., & Ostaszewska, M. (2011). Respiratory activity, energy and redox status in sulphur-deficient bean plants. *Environmental and Experimental Botany*, 74, 245–254.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.06.006>
- Kabir, A. H., Debnath, T., Das, U., Prity, S. A., Haque, A., Rahman, M. M., & Parvez, M. S. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate Fe-deficiency symptoms in sunflower by increasing iron uptake and its availability along with antioxidant defense. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 254–262.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.010>
- Kalaji, H. M., Bąba, W., Gediga, K., Goltsev, V., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Dimitrova, S., Piszcz, U., Bielecki, K., Karmowska, K., Dankov, K., & Kompała-Bąba, A. (2018). Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants.

Photosynthesis Research, 136(3), 329–343. <https://doi.org/10.1007/s11120-017-0467-7>

- Kalaji, H. M., Oukarroum, A., Alexandrov, V., Kouzmanova, M., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Allakhverdiev, S. I., & Goltsev, V. (2014). Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by *in vivo* chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry*, 81, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029>
- Karamanoli, K., Ainalidou, A., Bouzoukla, F., & Vokou, D. (2018). Decomposition profiles of leaf essential oils in the soil environment. *Industrial Crops and Products*, 124, 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.082>
- Kasampalis, D. S., Aktsoylou, D.-C., Tsouvaltzis, P., & Siomos, A. S. (2021). Responses of Peppermint and Spearmint Crops to Excessive Biostimulant Application and Increased Salinity in a Closed Soilless Production System. *Agronomy*, 11(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061168>
- Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in aquaponics: Significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, 71(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5>
- Kasozi, N., Tandlich, R., Fick, M., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2019). Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Reports*, 15, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100221>
- Khakyzadeh, V., Luque, R., Zolfigol, M. A., Vahidian, H. R., Salehzadeh, H., Moradi, V., Soleymani, A. R., Moosavi-Zare, A. R., & Xu, K. (2014). Waste to wealth: A sustainable aquaponic system based on residual nitrogen photoconversion. *RSC Advances*, 5(5), 3917–3921. <https://doi.org/10.1039/C4RA15242E>
- Khandaker, M., & Kotzen, B. (2018). The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. *Aquaculture Research*, 49(4), 1454–1468. <https://doi.org/10.1111/are.13601>
- Khodary, A. A., Osman, M. F., Amer, M. A., & Said, M. M. (2023). Performance of Red Tilapia Hybrid and Mint under Different Density Low Saline Integrated Aquaponic Systems. *Aquatic Science and Fish Resources (ASFR)*, 4(0), 1–12. <https://doi.org/10.21608/asfr.2023.180624.1030>
- Khruschev, S. S., Plyusnina, T. Yu., Antal, T. K., Pogosyan, S. I., Riznichenko, G. Yu., & Rubin, A. B. (2022). Machine learning methods for assessing photosynthetic activity:

- Environmental monitoring applications. *Biophysical Reviews*, 14(4), 821–842. <https://doi.org/10.1007/s12551-022-00982-2>
- Kledal, P. R., & Thorarinsdottir, R. (2018). Aquaponics: A Commercial Niche for Sustainable Modern Aquaculture. In F. I. Hai, C. Visvanathan, & R. Boopathy (Eds.), *Sustainable Aquaculture* (pp. 173–190). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2_6
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Staaks, G., Suhl, J., Tschirner, M., Wittstock, B., Wuertz, S., Zikova, A., & Rennert, B. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions*, 7(2), 179–192. <https://doi.org/10.3354/aei00146>
- Knaus, U., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2018). Significant factors affecting the economic sustainability of closed backyard aquaponics systems. Part IV: Autumn herbs and polyponics. *AACL Bioflux*, 11(6), 1760–1775.
- Knaus, U., & Palm, H. W. (2017a). Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 466, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025>
- Knaus, U., & Palm, H. W. (2017b). Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 473, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.020>
- Knaus, U., Pribbernow, M., Xu, L., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2020). Basil (*Ocimum basilicum*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany. *Sustainability*, 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su12208745>
- Knaus, U., Wenzel, L. C., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2020). Aquaponics (s.l.) Production of Spearmint (*Mentha spicata*) with African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Northern Germany. *Sustainability*, 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su12208717>
- Knaus, U., Zimmermann, J., Appelbaum, S., & Palm, H. W. (2022). Spearmint (*Mentha spicata*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany. *Sustainability*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su14010305>

- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, *132*, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kosegarten, H., Wilson, G. H., & Esch, A. (1998). The effect of nitrate nutrition on iron chlorosis and leaf growth in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *European Journal of Agronomy*, *8*(3), 283–292. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00021-5)
- Krigas, N., Tsoktouridis, G., Anestis, I., Khabbach, A., Libiad, M., Megdiche-Ksouri, W., Ghrabi-Gammar, Z., Lamchouri, F., Tsiripidis, I., Tsiadouli, M. A., El Haissoufi, M., & Bourgou, S. (2021). Exploring the Potential of Neglected Local Endemic Plants of Three Mediterranean Regions in the Ornamental Sector: Value Chain Feasibility and Readiness Timescale for Their Sustainable Exploitation. *Sustainability*, *13*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su13052539>
- Kroh, G. E., & Pilon, M. (2020). Regulation of Iron Homeostasis and Use in Chloroplasts. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijms21093395>
- Kumar, V., Pandita, S., Singh Sidhu, G. P., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., & Setia, R. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, *262*, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Larbi, A., Abadía, A., Abadía, J., & Morales, F. (2006a). Down co-regulation of light absorption, photochemistry, and carboxylation in Fe-deficient plants growing in different environments. *Photosynthesis Research*, *89*(2–3), 113–126. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9089-1>
- Larbi, A., Abadía, A., Abadía, J., & Morales, F. (2006b). Down co-regulation of light absorption, photochemistry, and carboxylation in Fe-deficient plants growing in different environments. *Photosynthesis Research*, *89*(2), 113–126. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9089-1>
- Lennard, W. (2012a). Aquaponic system design parameters: Basic system water chemistry. *Aquaponic Solutions*.
- Lennard, W. (2012b). Aquaponic system design parameters: Fish to plant ratios (feeding rate ratios). *Aquaponic Solutions*, 1–11.
- Lennard, W. (2012c). Aquaponic system design parameters: Solids filtration, treatment and re-use. *Aquaponic Solutions*.

- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14(6), 539–550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The Basics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 113–143). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5
- Lenz, G. L., Loss, A., Lourenzi, C. R., Luiz de Alcantara Lopes, D., Siebeneichler, L. de M., & Brunetto, G. (2021). Lettuce growth in aquaponic system and in soil fertilized with fish sludge. *Aquaculture Research*, 52(10), 5008–5021. <https://doi.org/10.1111/are.15372>
- Levine, C. P., & Mattson, N. S. (2021). Potassium-Deficient Nutrient Solution Affects the Yield, Morphology, and Tissue Mineral Elements for Hydroponic Baby Leaf Spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Horticulturae*, 7(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080213>
- Liang, J.-Y., & Chien, Y.-H. (2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.03.029>
- Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans*, 11, 591–592.
- Loshali, A., Joshi, B. C., & Sundriyal, A. (2019). Pharmacognostical and pharmacological review of *Urtica dioica* L. *Res. Rev. J. Pharmacol*, 6(2), 23–29.
- Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015). Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*, 68, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.003>
- Lubbe, A., & Verpoorte, R. (2011). Cultivation of medicinal and aromatic plants for specialty industrial materials. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 785–801. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.01.019>
- Lynn, L. Y., Amin, N. A. M., Arif, M. A., Ibrahim, R., Dzinun, H., & Ismail, N. I. M. (2022). Small-scale aquaponics and hydroponics systems: Pak choy and spinach growth rate comparison. *Multidisciplinary Applied Research and Innovation*, 3(1), Article 1.

- Mabroke, R. S., Zidan, A. E.-N. F. A., Tahoun, A.-A., Mola, H. R. A., Abo- State, H., & Suloma, A. (2021). Feeding frequency affect feed utilization of tilapia under biofloc system condition during nursery phase. *Aquaculture Reports*, *19*, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100625>
- Magbanua, T. O., & Ragaza, J. A. (2022). Selected dietary plant-based proteins for growth and health response of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.04.001>
- Mahankale, N. R. (2023). Global influence of synthetic fertilizers on climate change. *Applied Geomatics*. <https://doi.org/10.1007/s12518-023-00511-0>
- Malone, L. A., Proctor, M. S., Hitchcock, A., Hunter, C. N., & Johnson, M. P. (2021). Cytochrome b6f – Orchestrator of photosynthetic electron transfer. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, *1862*(5), 148380. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2021.148380>
- Mamat, N. Z., Shaari, M. I., & Wahab, N. A. A. A. (2016). The production of catfish and vegetables in an aquaponic system. *Fisheries and Aquaculture Journal*, *7*(4), age1–age1.
- Markos, N., & Kyparissis, A. (2011). Ecophysiological modelling of leaf level photosynthetic performance for three Mediterranean species with different growth forms. *Functional Plant Biology*, *38*(4), 314–326. <https://doi.org/10.1071/FP10155>
- Marschner, H., & Marschner, P. (Eds.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed). Elsevier/Academic Press.
- Masser, M. P., Rakocy, J., & Losordo, T. M. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. Management of recirculating systems. *SRAC Publication*, *452*.
- Matłok, N., Gorzelany, J., Stępień, A. E., Figiel, A., & Balawejder, M. (2019). Effect of Fertilization in Selected Phytometric Features and Contents of Bioactive Compounds in Dry Matter of Two Varieties of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Sustainability*, *11*(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/su11236590>
- Matłok, N., Stępień, A. E., Gorzelany, J., Wojnarowska-Nowak, R., & Balawejder, M. (2020). Effects of Organic and Mineral Fertilization on Yield and Selected Quality Parameters for Dried Herbs of Two Varieties of Oregano (*Origanum vulgare* L.). *Applied Sciences*, *10*(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/app10165503>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2017). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, *11*. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>

- Maucieri, C., Nicoletto, C., Os, E. van, Anseeuw, D., Havermaet, R. V., & Junge, R. (2019). Hydroponic Technologies. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 77–110). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4
- Maucieri, C., Nicoletto, C., van Os, E., Anseeuw, D., Van Havermaet, R., & Junge, R. (2019). Hydroponic technologies. *Aquaponics Food Production Systems*, 77–110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- McClung, C. R. (2006). Plant circadian rhythms. *The Plant Cell*, 18(4), 792–803. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.040980>
- McMurtry, M. R., Nelson, P. V., Sanders, D. C., & Hodges, L. (1990). Sand culture of vegetables using recirculated aquacultural effluents. *Applied Agricultural Research*, 5(4), 280–284.
- Medina, M., Jayachandran, K., Bhat, M. G., & Deoraj, A. (2016). Assessing plant growth, water quality and economic effects from application of a plant-based aquafeed in a recirculating aquaponic system. *Aquaculture International*, 24(1), 415–427. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9934-3>
- Mehrabi, Z., & Firouzbakhsh, F. (2020). Short-term effects of feeding powdered Aloe vera (*Aloe barbadensis*) and nettle (*Urtica dioica*) on growth performance and stimulation of innate immune responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comparative Clinical Pathology*, 29(2), 441–449. <https://doi.org/10.1007/s00580-019-03068-w>
- Mendoza-Tafolla, R. O., Juarez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R.-E., Sandoval-Villa, M., Alia-Tejacal, I., & Alejo-Santiago, G. (2019). Estimating Nitrogen and Chlorophyll Status of Romaine Lettuce Using SPAD and at LEAF Readings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(3), Article 3. <https://doi.org/10.15835/nbha47311525>
- Miklautsch, P., & Woschank, M. (2022). A framework of measures to mitigate greenhouse gas emissions in freight transport: Systematic literature review from a Manufacturer’s perspective. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132883>
- Milenković, L., Stanojević, J., Cvetković, D., Stanojević, L., Lalević, D., Šunić, L., Fallik, E., & Ilić, Z. S. (2019). New technology in basil production with high essential oil yield

- and quality. *Industrial Crops and Products*, 140, 111718. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111718>
- Miller, G. W., Huang, I. J., Welkie, G. W., & Pushnik, J. C. (1995). Function of iron in plants with special emphasis on chloroplasts and photosynthetic activity. In J. Abadía (Ed.), *Iron Nutrition in Soils and Plants* (pp. 19–28). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0503-3_4
- Mir, A. R., Pichtel, J., & Hayat, S. (2021). Copper: Uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *BioMetals*, 34(4), 737–759. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z>
- Mishra, B., & Chandra, M. (2022). Evaluation of phytoremediation potential of aromatic plants: A systematic review. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 31, 100405. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100405>
- Modarelli, G. C., Vanacore, L., Roupheal, Y., Langellotti, A. L., Masi, P., De Pascale, S., & Cirillo, C. (2023). Hydroponic and Aquaponic Floating Raft Systems Elicit Differential Growth and Quality Responses to Consecutive Cuts of Basil Crop. *Plants*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/plants12061355>
- Mohamed Abdelrahman, A. A. (2018). Effect of Feeding Frequency and Stocking Density on Tilapia *Oreochromis Niloticus* and Lettuce *Lactuca Sativa* Production in Aquaponics System under the UAE Condition and Business Enterprise Analysis. *Biology Theses*. https://scholarworks.uaeu.ac.ae/bio_theses/1
- Molassiotis, A., Tanou, G., Diamantidis, G., Patakas, A., & Therios, I. (2006). Effects of 4-month Fe deficiency exposure on Fe reduction mechanism, photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense in two peach rootstocks differing in Fe deficiency tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 163(2), 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.11.016>
- Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquaculture Environment Interactions*, 9, 9–18. <https://doi.org/10.3354/aei00205>
- Monsees, H., Klatt, L., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 48(7), 3482–3492. <https://doi.org/10.1111/are.13174>

- Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLOS ONE*, *12*(9), e0183056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056>
- Moosavi, A. A., & Ronaghi, A. (2011). Influence of foliar and soil applications of iron and manganese on soybean dry matter yield and iron-manganese relationship in a Calcareous soil. *Australian Journal of Crop Science*, *5*(12), 1550–1556. <https://doi.org/10.3316/informit.005672665467503>
- Morales, F., Belkhdja, R., Abadía, A., & Abadía, J. (2000). Photosystem II efficiency and mechanisms of energy dissipation in iron-deficient, field-grown pear trees (*Pyrus communis* L.). *Photosynthesis Research*, *63*(1), 9–21. <https://doi.org/10.1023/A:1006389915424>
- Morales, M. R., Simon, J. E., & Charles, D. J. (1993). Comparison of Essential Oil Content and Composition Between Field and Greenhouse Grown Genotypes of Methyl Cinnamate Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, *1*(4), 25–30. https://doi.org/10.1300/J044v01n04_05
- Morsy, N. F. S., & Hammad, K. S. M. (2021). Extraction of essential oil from methyl cinnamate basil (*Ocimum canum* Sims) with high yield in a short time using enzyme pretreatment. *Journal of Food Science and Technology*, *58*(7), 2599–2605. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04766-y>
- Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2012). The interaction of zinc with other elements in plants: A review. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, *4*, 1881–1884.
- Mu, X., & Chen, Y. (2021). The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, *158*, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.019>
- Mujezinović, F., Avdić, J., Livančić, B., Ašimović, Z., Smajić Murtić, M., & Murtić, S. (2022). Enhancement of Antioxidant Properties of Lavender (*Lavandula officinalis* L.), Sage (*Salvia officinalis* L.) and Basil (*Ocimum basilicum* L.) by Application of Natural Biostimulants. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, *87*(1), 77–81.
- Mullins, C., & Nerrie, B. (2016). *Principles of Small-Scale Aquaponics*.
- Mullis, D., & Reyes, J. (2019). The overall effects of soilless agricultural system on basil (*Ocimum basilicum* L.). *CCAMLR Science*, 300–308.

- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3983–3998. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert208>
- Naegel, L. C. A. (1977). Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, 10(1), 17–24. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(77\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90029-1)
- Nelson, R. L., & Pade, J. S. (2007). *Aquaponic Equipment The Clarifier*.
- Ng, W.-K., & Romano, N. (2013). A review of the nutrition and feeding management of farmed tilapia throughout the culture cycle. *Reviews in Aquaculture*, 5(4), 220–254. <https://doi.org/10.1111/raq.12014>
- Ngugi, C. C., Oyoo-Okoth, E., Mugo-Bundi, J., Orina, P. S., Chemoiwa, E. J., & Aloo, P. A. (2015). Effects of dietary administration of stinging nettle (*Urtica dioica*) on the growth performance, biochemical, hematological and immunological parameters in juvenile and adult Victoria Labeo (*Labeo victorianus*) challenged with *Aeromonas hydrophila*. *Fish & Shellfish Immunology*, 44(2), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.03.025>
- Nguyen, P. C. T., Tran, Q. N., Nguyen, N. H., Thai, T. T. T., & Nguyen, N. T. (2023). Influence of different hydroponic units on fish and plant performance and water quality in a snakehead fish-mint aquaponics system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1155(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1155/1/012006>
- Nichols, M. A., & Savidov, N. A. (2012). Aquaponics: A nutrient and water efficient production system. *Acta Horticulturae*, 947, 129–132. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.14>
- Nichols, M., & Lennard, W. (2010). Aquaponics in New Zealand. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, 115, 46–51. <https://doi.org/10.3316/informit.484048308959540>
- Nicoletto, C., Maucieri, C., Mathis, A., Schmautz, Z., Komives, T., Sambo, P., & Junge, R. (2018). Extension of aquaponic water use for NFT baby-leaf production: Mizuna and rocket Salad. *Agronomy*, 8(5), 75. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050075>
- Nozzi, V., Graber, A., Schmautz, Z., Mathis, A., & Junge, R. (2018). Nutrient management in aquaponics: Comparison of three approaches for cultivating lettuce, mint and mushroom herb. *Agronomy*, 8(3), 27. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030027>
- NRC, N. R. C. (1993). *Nutrient Requirements of Fish*. National Academies Press.

- Ogah, S. I., Kamarudin, M. S., Nurul Amin, S. M., & Puteri Edaroyati, M. W. (2020). Biological filtration properties of selected herbs in an aquaponic system. *Aquaculture Research*, *51*(5), 1771–1779. <https://doi.org/10.1111/are.14526>
- Ogah, S., Kamarudin, M. S., Amin, S. M. N., & Megat Wahab, P. (2020). Nutrient recycling through aquaponics and night-lighting. *Journal of Environmental Biology*, *41*, 1113–1125. [https://doi.org/10.22438/jeb/41/5\(SI\)/MS_01](https://doi.org/10.22438/jeb/41/5(SI)/MS_01)
- Padhi, B., Chauhan, G., Kandoi, D., Stirbet, A., Tripathy, B. C., & Govindjee, G. (2021). A comparison of chlorophyll fluorescence transient measurements, using Handy PEA and FluorPen fluorimeters. *Photosynthetica*, *59*(SPECIAL ISSUE), 399–408. <https://doi.org/10.32615/ps.2021.026>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, *26*(3), 813–842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Palm, H. W., Seidemann, R., Wehofsky, S., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: System design, chemophysical parameters and general aspects. *AACL Bioflux*, *7*(1), 20–32.
- Pandey, D., Kehri, H. K., Zoomi, I., Singh, U., Chaudhri, K. L., & Akhtar, O. (2020). Potassium Solubilizing Microbes: Diversity, Ecological Significances and Biotechnological Applications. In A. N. Yadav, J. Singh, A. A. Rastegari, & N. Yadav (Eds.), *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture* (pp. 263–286). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_9
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: Production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, *927*(927), 887–893. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Danieli, P. P., MacNiven, A., & Colla, G. (2011). *Integrated aquaculture - floating agriculture: Is it a valid strategy to raise livelihood?* <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/307245>
- Paschalidis, K., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Tzanakakis, V. A., Biliadis, F., Samara, E., Kalogiannakis, K., Debouba, F. J., Ipsilantis, I., Tsoktouridis, G., Matsi, T., & Krigas, N. (2021). Pilot Cultivation of the Vulnerable Cretan Endemic *Verbascum arcturus* L. (Scrophulariaceae): Effect of Fertilization on Growth and Quality Features. *Sustainability*, *13*(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su132414030>

- Patel, M., Fatnani, D., & Parida, A. K. (2022). Potassium deficiency stress tolerance in peanut (*Arachis hypogaea*) through ion homeostasis, activation of antioxidant defense, and metabolic dynamics: Alleviatory role of silicon supplementation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *182*, 55–75. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.04.013>
- Paulauskienė, A., Tarasevičienė, Ž., & Laukagalis, V. (2021). Influence of Harvesting Time on the Chemical Composition of Wild Stinging Nettle (*Urtica dioica* L.). *Plants*, *10*(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/plants10040686>
- Peterson, R., & Jensén, P. (1986). Effects of Nettle Water on Growth and Mineral Nutrition of Plants. II. Pot- and Water-Culture Experiments. *Biological Agriculture & Horticulture*, *4*(1), 7–18. <https://doi.org/10.1080/01448765.1986.9754482>
- Petrea, S. M., Cristea, V., Dediu, L., Contoman, M., Lupoae, P., Plăcintă (Ion), S., Coadă Marian, T., & Enache, M. (2013). A comparison of nitrate level in spinach grown both under different densities in aquaponic system and under natural growth conditions. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI - Food Technology*, *37*(2), Article 2.
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Ntatsi, G., Levizou, E., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2016). Nutritional profile and chemical composition of *Cichorium spinosum* ecotypes. *LWT*, *73*, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.046>
- Petropoulos, S. A., Levizou, E., Ntatsi, G., Fernandes, Â., Petrotos, K., Akoumianakis, K., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chemistry*, *214*, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.080>
- Petropoulos, S., Fernandes, Â., Karkanis, A., Antoniadis, V., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2018). Nutrient solution composition and growing season affect yield and chemical composition of *Cichorium spinosum* plants. *Scientia Horticulturae*, *231*, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.022>
- Pickens, J. (2015). *Integrating effluent from recirculating aquaculture systems with greenhouse cucumber and tomato production*. <https://etd.auburn.edu/handle/10415/4782>
- Picoli, F., Marques, S. de O., Oliveira, A. D. de, Nunes, C. G., Serafini, S., Klein, B., de Oliveira, N. S., Santos, N. N. O. dos, Zampar, A., Lopes, D. L. de A., & El Hadi Perez Fabregat, T. (2022). Mixed culture microorganisms fermented soybean meal improves productive performance and intestinal health of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) juveniles fed plant-based diets in a biofloc system. *Aquaculture Research*, *53*(12), 4233–4245. <https://doi.org/10.1111/are.15859>

- Pocketbook, F. S. (2015). *World food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytologist*, *182*(3), 565–588. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Psaroudaki, A., Dimitropoulakis, P., Constantinidis, T., Katsiotis, A., & Skaracis, G. N. (2012). Ten Indigenous Edible Plants: Contemporary Use in Eastern Crete, Greece. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, *34*(2), 172–177. <https://doi.org/10.1111/j.2153-9561.2012.01076.x>
- Purwandari, Y., Effendi, H., & Wardiatno, Y. (2017). The use of gouramy (*Osphronemus goramy*) rearing wastewater for growing romaine lettuce (*Lactuca Sativa* L. Var. Longifolia) in aquaponic system. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, *19*, 359–366.
- Rafiee, G., & Saad, C. (2006). The effect of natural zeolite (Clinoptiolite) on aquaponic production of red tilapia (*Oreochromis* sp.) and lettuce (*Lactuca sativa* var. Longifolia), and improvement of water quality. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *8*(4), 313–322.
- Rafiee, G., & Saad, C. R. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, *244*(1), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.10.029>
- Rafiee, Gh. R., Ros Saad, Ch., Kamarudin, M. S., Ismail, M. R., & Sijam, K. (2019). Effects of supplementary nutrient in an aquaponic system for production of ornamental red tilapia (*Oreochromis* Sp.) and lettuce (*Lactuca sativa* var longifolia). *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, *5*(2). <https://doi.org/10.18331/SFS2019.5.2.7>
- Rai, S., Singh, P. K., Mankotia, S., Swain, J., & Satbhai, S. B. (2021). Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, *1*, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008>
- Rakocy, J. E. (2012). Aquaponics—Integrating fish and plant culture, aquaculture production systems. *Aquaculture Production Systems*, *1*, 344–386.
- Rakocy, J. E., Bailey, D. S., Shultz, R. C., & Thoman, E. S. (2004). Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In *New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Held September, 12-16*.

- Rakocy, J. E., & Hargreaves, J. A. (1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: A review. *Wang J (Ed) Techniques for Modern Aquaculture. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph.*
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture.*
- Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Horticulturae*, 648, 63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8>
- Ram, M., Singh, M., Prajapati, A. K., Ram, D., & Rawat, G. (2012). Towards sustainable production of peppermint (*Mentha piperita* L.) through integrated use of vermicompost and cowpea green manuring with synthetic nitrogen fertilization. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(3), 293–301. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.514266>
- Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1–12), 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)
- Rayhan, Md. Z., Rahman, Md. A., Hossain, Md. A., Akter, T., & Akter, T. (2018). Effect of stocking density on growth performance of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) with Indian spinach (*Basella alba*) in a recirculating aquaponic system. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 3(2), 343–349. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.2.5>
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7th ed). CRC Press.
- Rhodes, S. A., & Chong, J.-H. (2016). Less is more? Basil growth and flowering under below-recommended nitrogen fertilization rates. *Journal of Environmental Horticulture*, 34(3), 84–90. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-34.3.84>
- Riche, M., & Garling, D. (2003). Feeding Tilapia in Intensive Recirculating Systems. *North Central Regional Aquaculture Centre.*
- Riche, M., Haley, D. I., Oetker, M., Garbrecht, S., & Garling, D. L. (2004). Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 234(1–4), 657–673. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.12.012>
- Riche, M., Oetker, M., Haley, D. I., Smith, T., & Garling, D. L. (2004). *Effect of feeding frequency on consumption, growth, and efficiency In juvenile tilapia (Oreochromis niloticus).* <http://evols.library.manoa.hawaii.edu/handle/10524/19120>

- Ridoutt, B. G., Baird, D., & Hendrie, G. A. (2021). The role of dairy foods in lower greenhouse gas emission and higher diet quality dietary patterns. *European Journal of Nutrition*, 60(1), 275–285. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02245-w>
- Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Sánchez, J., & Goosen, N. (2019). Fish Diets in aquaponics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 333–352). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_13
- Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. (2022a). Complementary nutrients in decoupled aquaponics enhance basil performance. *Horticulturae*, 8(2), 111. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020111>
- Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. (2022b). Complementary Nutrients in Decoupled Aquaponics Enhance Basil Performance. *Horticulturae*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020111>
- Rono, K., Manyala, J., Manguya-Lusega, D., Sabwa, J., Yongo, E., Ngugi, C., Fitzsimmons, K., & Egna, H. (2018). *Growth performance of spinach (Spinacia oleracea) on diets supplemented with iron-amino acid complex in aquaponic system in Kenya*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1320099>
- Roosta, H. R. (2014a). 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. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.890220>
- Roosta, H. R. (2014b). Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 37(14), 2236–2254. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920385>
- Roosta, H. R., & Afsharipoor, S. (2012). Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Advances in Environmental Biology*, 6(2), 543–555.
- Roosta, H. R., Estaji, A., & Niknam, F. (2018). Effect of iron, zinc and manganese shortage-induced change on photosynthetic pigments, some osmoregulators and chlorophyll fluorescence parameters in lettuce. *Photosynthetica*, 56(2), 606–615. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0696-1>

- Roosta, H. R., & Ghorbani, F. (2011). Investigation of the growth and development, essential oil and minerals content in two species of mint in hydroponics and aquaponics. *J. Sci. & Technol. Greenhouse Culture*, 2(7).
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2013). Mineral nutrient content of tomato plants in aquaponic and hydroponic systems: Effect of foliar application of some macro- and micro-nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 36(13), 2070–2083. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.821707>
- Roosta, H. R., & Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae*, 146, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.018>
- Roosta, H. R., & Sajjadinia, A. R. (2010). Investigating physiological characteristics of mint in the Raft aquaponic system and perlite medium. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 1(3), 51–61.
- Roy, K., Kajgrova, L., & Mraz, J. (2022). TILAFeed: A bio-based inventory for circular nutrients management and achieving bioeconomy in future aquaponics. *New Biotechnology*, 70, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2022.04.002>
- Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X., & Lv, Z. (2017). Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 16328–16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>
- Sabry, R., Elsayed, A., Khattab, M., & Ahmed, S. (2019). Performance of eight cultivars of sweet basil grown under Egyptian conditions. 08, 1281–1289. <https://doi.org/10.36632/mejar/2019.8.4.30>
- Saha, S., Monroe, A., & Day, M. R. (2016). Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2016.10.001>
- Salama, S., Kandil, A., Elshenawy, M. Z., Abdelbaki, M., & Abulseoud, M. (2020). Evaluation of mint and sweet basil herbs production integrated into the aquaponic tilapia production system. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 28(2), 563–573. <https://doi.org/10.21608/ajs.2020.21645.1147>

- Samborska-Skutnik, I. A., Kalaji, H. M., Sieczko, L., & Bąba, W. (2020). Special issue in honour of Prof. Reto J. Strasser – Structural and functional response of photosynthetic apparatus of radish plants to iron deficiency. *Photosynthetica*, 58(SPECIAL ISSUE), 205–213. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.132>
- Sangwan, N. S., Farooqi, A. H. A., Shabih, F., & Sangwan, R. S. (2001). Regulation of essential oil production in plants. *Plant Growth Regulation*, 34(1), 3–21. <https://doi.org/10.1023/A:1013386921596>
- Sayara, T., Amarneh, B., Saleh, T., Aslan, K., Abuhanish, R., & Jawabreh, A. (2016). Hydroponic and aquaponic systems for sustainable agriculture and environment. *International Journal of Plant Science and Ecology*, 2(3), 23–29.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of Three Hydroponic Methods. *Water*, 8(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E. H., & Verreth, J. A. J. (2005). Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32(3–4), 379–401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001>
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335–1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
- Setiadi, E., Widyastuti, Y. R., & Prihadi, T. H. (2018). Water Quality, Survival, and Growth of Red Tilapia, *Oreochromis niloticus* Cultured In Aquaponics System. *E3S Web of Conferences*, 47, 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184702006>
- Shafiullah, M., Khalid, U., & Shahbaz, M. (2021). Does meat consumption exacerbate greenhouse gas emissions? Evidence from US data. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 11415–11429. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11331-9>
- Shahrajabian, M. H., Sun, W., & Cheng, Q. (2020). Chemical components and pharmacological benefits of Basil (*Ocimum basilicum*): A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1961–1970. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1828456>
- Shete, A. P., Verma, A. K., Chadha, N. K., Prakash, C., Chandrakant, M. H., & Nuwansi, K. K. T. (2017). Evaluation of different hydroponic media for mint (*Mentha arvensis*) with common carp (*Cyprinus carpio*) juveniles in an aquaponic system. *Aquaculture International*, 25(3), 1291–1301. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0114-5>

- Shete, A. P., Verma, A. K., Tandel, R. S., Prakash, C., Tiwari, V. K., & Hussain, T. (2013). Optimization of water circulation period for the culture of goldfish with spinach in aquaponic system. *Journal of Agricultural Science*, 5(4), p26. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n4p26>
- Shirahmadi, S., Esna-Ashari, M., Aliniaefard, S., & Abbas Akbari, G. (2022). Natural Variation for Salt Tolerance among Basil Accessions from Iran Based on Fluorescence Transient and Morphological and Growth Characteristics. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(1), 183–198.
- Shiyab, S. M., Shatnawi, M. A., Shibli, R. A., Al Smeirat, N. G., Ayad, J., & Akash, M. W. (2013). Growth, Nutrient Acquisition, and Physiological Responses of Hydroponic Grown Tomato to Sodium Chloride Salt Induced Stress. *Journal of Plant Nutrition*, 36(4), 665–676. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.754037>
- Silva, L., Gasca-Leyva, E., Escalante, E., Fitzsimmons, K., & Lozano, D. (2015). Evaluation of biomass yield and water treatment in two aquaponic systems using the dynamic root floating technique (DRF). *Sustainability*, 7(11), 15384–15399. <https://doi.org/10.3390/su71115384>
- Silva, L., Valdés-Lozano, D., Escalante, E., & Gasca-Leyva, E. (2018). Dynamic root floating technique: An option to reduce electric power consumption in aquaponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 183, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.086>
- Silva, M. A., Alvarenga, É. R., Costa, F. F. B. da, Turra, E. M., Alves, G. F. de O., Manduca, L. G., Sales, S. C. M., Leite, N. R., Bezerra, V. M., Moraes, S. G. da S., & Teixeira, E. de A. (2020). Feeding management strategies to optimize the use of suspended feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in bioflocs. *Aquaculture Research*, 51(2), 605–615. <https://doi.org/10.1111/are.14408>
- Smitha, G. R., & Rana, V. S. (2015). The Effect of Viral Infection on Essential Oil Content, Chemical Composition and Biomass Yield of Mentha cultivars. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 18(2), 389–397. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.963166>
- Solis-Toapanta, E., Fisher, P., & Gómez, C. (2020). Growth Rate and Nutrient Uptake of Basil in Small-scale Hydroponics. *HortScience*, 55(4), 507–514. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14727-19>
- Solouki, A., Zare Mehrjerdi, M., Azimi, R., & Aliniaefard, S. (2023). Improving basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil yield following down-regulation of photosynthetic

- functionality by short-term application of abiotic elicitors. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 50, 102675. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102675>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*.
- Sonneveld, C., & Straver, N. (1994). Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. *Voedingspolossingen Glastijnbouw*, 8(1), 33.
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer.
- Sousa, R. M. R., Agostinho, C. A., Oliveira, F. A., Argentim, D., Novelli, P. K., & Agostinho, S. M. M. (2012). Productive performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed at different frequencies and periods with automatic dispenser. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 64, 192–197. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352012000100027>
- Souza, M. A. A., Araújo, O. J. L., Brito, D. M. C., Fernandes, M. S., Castro, R. N., & Souza, S. R. (2014). Chemical Composition of the essential oil and nitrogen metabolism of menthol mint under different phosphorus levels. *American Journal of Plant Sciences*, 5(15), Article 15. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.515245>
- Stathopoulou, P., Berillis, P., Vlahos, N., Nikouli, E., Kormas, K. A., Levizou, E., Katsoulas, N., & Mente, E. (2021). Freshwater-adapted sea bass *Dicentrarchus labrax* feeding frequency impact in a lettuce *Lactuca sativa* aquaponics system. *PeerJ*, 9, e11522. <https://doi.org/10.7717/peerj.11522>
- Stathopoulou, P., Tsoumalakou, E., Levizou, E., Vanikiotis, T., Zaoutsos, S., & Berillis, P. (2021). Iron and potassium fertilization improve rocket growth without affecting tilapia growth and histomorphology characteristics in aquaponics. *Applied Sciences*, 11(12), 5681. <https://doi.org/10.3390/app11125681>
- Stouvenakers, G., Dapprich, P., Massart, S., & Jijakli, H. (2019). Plant Pathogens and Control Strategies in Aquaponics. In *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (pp. 353–378). Springer Open, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_14
- Strasser, R. J., Srivastava, A., & Tsimilli-Michael, M. (2000). The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In *Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation* (pp. 445–483). Taylor & Francis.

- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis. Advances in photosynthesis and respiration* (Springer, Vol. 19, pp. 321–362).
- Sukhova, E., & Sukhov, V. (2018). Connection of the Photochemical Reflectance Index (PRI) with the Photosystem II Quantum Yield and Nonphotochemical Quenching Can Be Dependent on Variations of Photosynthetic Parameters among Investigated Plants: A Meta-Analysis. *Remote Sensing*, *10*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/rs10050771>
- Sukhova, E., & Sukhov, V. (2019). Analysis of Light-Induced Changes in the Photochemical Reflectance Index (PRI) in Leaves of Pea, Wheat, and Pumpkin Using Pulses of Green-Yellow Measuring Light. *Remote Sensing*, *11*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs11070810>
- Sukhova, E., & Sukhov, V. (2020). Relation of Photochemical Reflectance Indices Based on Different Wavelengths to the Parameters of Light Reactions in Photosystems I and II in Pea Plants. *Remote Sensing*, *12*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs12081312>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2011). *Plant Physiology*. UTOPIA ΕΚΔΟΣΕΙΣ Μ. ΕΠΕ.
- Taragusti, A. S., Santanumurti, M. B., Rahardja, B. S., & Prayogo. (2019). Effectiveness of Nitrobacter on the specific growth rate, survival rate and feed conversion ratio of dumbo catfish *Clarias* sp. With density differences in the aquaponic system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *236*(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/236/1/012088>
- Taylor, M. D., & Locascio, S. J. (2004). Blossom-End Rot: A Calcium Deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, *27*(1), 123–139. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027551>
- Tewari, R. K., Yadav, N., Gupta, R., & Kumar, P. (2021). Oxidative Stress Under Macronutrient Deficiency in Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(1), 832–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00405-9>
- Thakur, K., Kuthiala, T., Singh, G., Arya, S. K., Iwai, C. B., Ravindran, B., Khoo, K. S., Chang, S. W., & Awasthi, M. K. (2023). An alternative approach towards nitrification and bioremediation of wastewater from aquaponics using biofilm-based bioreactors: A review. *Chemosphere*, *316*, 137849. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137849>
- Thomas, R. M., Verma, A. K., Prakash, C., Krishna, H., Prakash, S., & Kumar, A. (2019). Utilization of Inland saline underground water for bio-integration of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and spinach (*Spinacia oleracea*). *Agricultural Water Management*, *222*, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.001>

- Thongprajukaew, K., Kovitvadhi, S., Kovitvadhi, U., & Preprame, P. (2017). Effects of feeding frequency on growth performance and digestive enzyme activity of sex-reversed Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). *Agriculture and Natural Resources*, 51(4), 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2017.04.005>
- Thorarinsdottir, R. (2015). *Aquaponics Guidelines*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4975.6880>
- Tissot, N., Przybyla-Toscano, J., Reyt, G., Castel, B., Duc, C., Boucherez, J., Gaymard, F., Briat, J.-F., & Dubos, C. (2014). Iron around the clock. *Plant Science*, 224, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.03.015>
- Torno, J., Einwächter, V., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2018). Nitrate has a low impact on performance parameters and health status of on-growing European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) reared in RAS. *Aquaculture*, 489, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.01.043>
- Tóth, S. Z., Schansker, G., & Strasser, R. J. (2007). A non-invasive assay of the plastoquinone pool redox state based on the OJIP-transient. *Photosynthesis Research*, 93(1), 193. <https://doi.org/10.1007/s11120-007-9179-8>
- Tsoumalakou, E., Mente, E., Kormas, K. A., Katsoulas, N., Vlahos, N., Kapsis, P., & Levizou, E. (2022). Precise Monitoring of Lettuce Functional Responses to Minimal Nutrient Supplementation Identifies Aquaponic System’s Nutrient Limitations and Their Time-Course. *Agriculture*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081278>
- Tsoumalakou, E., Mente, E., Vlahos, N., & Levizou, E. (2023). Spinach Responds to Minimal Nutrient Supplementation in Aquaponics by Up-Regulating Light Use Efficiency, Photochemistry, and Carboxylation. *Horticulturae*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030291>
- Tsoumalakou, E., Stathopoulou, P., Berillis, P., & Levizou, E. (2022). Iron and potassium supplementation effects on rocket grown in aquaponics. *Unpublished Data*.
- Tyson, R. V. (2017). Can aquaponics be mainstreamed through decoupling? *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 130, 263–265.
- Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., White, J. M., & Simonne, A. (2008). Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Reconciling+pH+for+Ammonia+Bio

- filtration+and+Cucumber+Yield+in+a+Recirculating+Aquaponic+System+with+Perlite+Biofilters&author=Tyson%2C+R.V.&publication_year=2008
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simmone, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*.
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Opportunities+and+Challenges+to+Sustainability+in+Aquaponic+Systems&author=Tyson%2C+Richard+V.&publication_year=2011
- UNITED NATIONS. (2016). *UNITED NATIONS SECRETARY-GENERAL'S PLAN: WATER ACTION DECADE 2018-2028*.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, *157*(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vandam, D., Anderson, T., de Villiers, D., & Timmons, M. (2017). Growth and tissue elemental composition response of spinach (*Spinacia oleracea*) to hydroponic and aquaponic water quality conditions. *Horticulturae*, *3*(2), 32. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020032>
- Vanikiotis, T., Stagakis, S., & Kyparissis, A. (2021). MODIS PRI performance to track Light Use Efficiency of a Mediterranean coniferous forest: Determinants, restrictions and the role of LUE range. *Agricultural and Forest Meteorology*, *307*, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108518>
- Vaštakaitė-Kairienė, V., Brazaitytė, A., Miliauskienė, J., & Runkle, E. S. (2022). Red to Blue Light Ratio and Iron Nutrition Influence Growth, Metabolic Response, and Mineral Nutrients of Spinach Grown Indoors. *Sustainability*, *14*(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su141912564>
- Vlahos, N., Levizou, E., Stathopoulou, P., Berillis, P., Antonopoulou, E., Bekiari, V., Krigas, N., Kormas, K., & Mente, E. (2019). An experimental brackish aquaponic system using juvenile gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) and Rock Samphire (*Crithmum maritimum*). *Sustainability*, *11*(18), 4820. <https://doi.org/10.3390/su11184820>
- Wang, C.-Y., Chang, C.-Y., Chien, Y.-H., & Lai, H.-T. (2016). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *107*, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.016>
- Wang, X., Chen, J. M., & Ju, W. (2020). Photochemical reflectance index (PRI) can be used to improve the relationship between gross primary productivity (GPP) and sun-induced

- chlorophyll fluorescence (SIF). *Remote Sensing of Environment*, 246, 111888. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111888>
- Water, U. (2015). *Water for a sustainable world* (The United Nations World Water Development Report). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr>
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). Analysis of Phenolic Plant Metabolites. *Blackwell Oxford, U.K.*
- Wattanukul, W., Thongprajukaew, K., Hahor, W., & Suanyuk, N. (2021). Optimal Replacement of Soybean Meal with Fermented Palm Kernel Meal as Protein Source in a Fish Meal-Soybean Meal-Based Diet of Sex Reversed Red Tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*). *Animals*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/ani11082287>
- Weng, J.-H., Liao, T.-S., Hwang, M.-Y., Chung, C.-C., Lin, C.-P., & Chu, C.-H. (2006). Seasonal variation in photosystem II efficiency and photochemical reflectance index of evergreen trees and perennial grasses growing at low and high elevations in subtropical Taiwan. *Tree Physiology*, 26(8), 1097–1104. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.8.1097>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in Plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Whitton, C., Bogueva, D., Marinova, D., & Phillips, C. J. C. (2021). Are We Approaching Peak Meat Consumption? Analysis of Meat Consumption from 2000 to 2019 in 35 Countries and Its Relationship to Gross Domestic Product. *Animals*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ani11123466>
- WHO. (2015). Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment. *World Health Organization*, Geneva.
- Williams, D. R., Clark, M., Buchanan, G. M., Ficotola, G. F., Rondinini, C., & Tilman, D. (2021). Proactive conservation to prevent habitat losses to agricultural expansion. *Nature Sustainability*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00656-5>
- Wilson, L., Duncan, N., & Crain, D. (2017). Comparison of Aquaponics and Hydroponics on Basil (*Ocimum basilicum*) Morphometrics and Essential Oil Composition. *RURALS: Review of Undergraduate Research in Agricultural and Life Sciences*, 11(1). <https://digitalcommons.unl.edu/rurals/vol11/iss1/3>
- Witkowski, E. T. F., & Lamont, B. B. (1991). Leaf specific mass confounds leaf density and thickness. *Oecologia*, 88(4), 486–493. <https://doi.org/10.1007/BF00317710>

- Wortman, S. E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 194, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.045>
- Yang, T., & Kim, H.-J. (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Yang, T., & Kim, H.-J. (2020). Characterizing Nutrient Composition and Concentration in Tomato-, Basil-, and Lettuce-Based Aquaponic and Hydroponic Systems. *Water*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w12051259>
- Yudina, L., Sukhova, E., Gromova, E., Nerush, V., Vodeneev, V., & Sukhov, V. (2020). A light-induced decrease in the photochemical reflectance index (PRI) can be used to estimate the energy-dependent component of non-photochemical quenching under heat stress and soil drought in pea, wheat, and pumpkin. *Photosynthesis Research*, 146(1), 175–187. <https://doi.org/10.1007/s11120-020-00718-x>
- Yue, Y.-R., & Zhou, Q.-C. (2008). Effect of replacing soybean meal with cottonseed meal on growth, feed utilization, and hematological indexes for juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Aquaculture*, 284(1), 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.07.030>
- Zare, M., Esmaili, N., Paolacci, S., & Stejskal, V. (2023). Nettle (*Urtica dioica*) Additive as a Growth Promoter and Immune Stimulator in Fish. *Aquaculture Nutrition*, 2023, e8261473. <https://doi.org/10.1155/2023/8261473>
- Zeipina, S., Alsina, I., & Lapse, L. (2014). Stinging nettle—The source of biologically active compounds as sustainable daily diet supplement. *Research for Rural Development*, 1, 34–38.
- Zhang, H., Gao, Y., Liu, J., Lin, Z., Hashim, H., Wu, W., & Li, C. (2021). Recovery of Nutrients from Fish Sludge as Liquid Fertilizer to Enhance Sustainability of Aquaponics: A Review. *Chemical Engineering Transactions*, 83, 2021. <https://doi.org/10.3303/CET2183010>
- Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., & Zhu, J.-K. (2022). Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics*, 23(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00413-0>
- Zhao, D., Oosterhuis, D. M., & Bednarz, C. W. (2001). Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. *Photosynthetica*, 39(1), 103–109. <https://doi.org/10.1023/A:1012404204910>

- Zou, Q., Huang, Y., Cao, J., Zhao, H., Wang, G., Li, Y., & Pan, Q. (2017). Effects of four feeding stimulants in high plant-based diets on feed intake, growth performance, serum biochemical parameters, digestive enzyme activities and appetite-related genes expression of juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis* sp.). *Aquaculture Nutrition*, 23(5), 1076–1085. <https://doi.org/10.1111/anu.12475>
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C., & Fang, Y. (2016). Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresource Technology*, 210, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.079>
- Αϊβαλάκις, Γ., Καραμπουρνιώτης, Γ., & Λιακόπουλος, Γ. (2016). *Φυσιολογία φυτών* (Εμβryo).
- Καραμπουρνιώτης, Γ. Α., Λιακόπουλος, Γ., & Νικολόπουλος, Δ. (2012). *Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών* (Εμβryo).
- Κυζερίδου, Α. (2015). *ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΚΑΡΠΩΝ: συσχέτιση με τις ιδιαιτερότητες του εσωτερικού μικροπεριβάλλοντος και των φωτοπροστατευτικών και μεταβολικών τους αναγκών*. Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πηγές εικόνων:

<https://theaquaponicsource.com/>)

<https://gogreenaquaponics.com/>)

<https://ag.purdue.edu/envision/the-big-idea-hydroponics-aquaponics/>

<https://foodrevolution.org/blog/hydroponics/>

<https://nosoilsolutions.com/>

<https://ajayfibreglass.com.au/>