

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Επίδραση του επιπέδου διατροφής στην ανάπτυξη και επιβίωση του κοινού
κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) και του μαρουλιού (*Lactuca sativa*) σε ενυδρειοπονικό
σύστημα με τη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας»

Ανδρέας Χριστόπουλος

ΒΟΛΟΣ 2025

UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF ICHTHYOLOGY AND AQUATIC
ENVIRONMENT

POSTGRADUATE COURSE IN MEDITERRANEAN AQUACULTURE

POSTGRADUATE MASTER'S THESIS

*« The effect of the nutrition level on growth and survival rate of common
carp and lettuce in a raft aquaponic system »*

Andreas Christopoulos

VOLOS 2025

«Επίδραση του επιπέδου διατροφής στην ανάπτυξη και επιβίωση του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) και του μαρουλιού (*Lactuca sativa*) σε ενυδρειοπονικό σύστημα με τη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας»

Τριμελής Συμβουλευτική Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) **Νικόλαος Βλάχος**, Επίκουρος Καθηγητής, Διατροφή Εκτρεφόμενων Ιχθύων. Τμήμα Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών, **Επιβλέπων**.
- 2) **Ελένη Μεντέ**, Καθηγήτρια, Φυσιολογία Θρέψης Υδρόβιων Ζωικών Οργανισμών, Τμήμα Κτηνιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, **Μέλος**
- 3) **Παναγιώτης Βερίλλης**, Καθηγητής, Μικροσκοπία και Ανάλυση Εικόνας στην Ιστολογία και στους Υδρόβιους Οργανισμούς Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

***Αφιερωμένη
στην οικογένειά μου***

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Νικόλαο Βλάχο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών και επιβλέποντα της εργασίας, για τη διαρκή καθοδήγηση, την υποστήριξη και την πολύτιμη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, της ανάλυσης των δεδομένων και της συγγραφής της παρούσας μελέτης.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, την κυρία Ελένη Μεντέ, Καθηγήτρια του Τμήματος Κτηνιατρικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, και τον κύριο Παναγιώτη Βερίλλη, Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, για την καθοριστική υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις τους κατά την πορεία εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για τη διαρκή συμπαράσταση, την ηθική και πολύπλευρη στήριξη που μου παρείχαν τόσο κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών όσο και κατά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίδραση τριών διαφορετικών επιπέδων διατροφής (2%, 5% και 7% του ζ.β./ημέρα) του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) σε σύστημα ενυδρειοπονίας με τη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας (RAFT), όταν συγκαλλιεργείται με το μαρούλι (*Lactuca sativa*). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του επιπέδου διατροφής συνοδεύτηκε από σημαντική αύξηση του ρυθμού παραγωγής της αμμωνίας στο νερό (P_{TAN}), γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη παραγωγή μεταβολικών αποβλήτων. Η P_{TAN} κυμάνθηκε από 0,15 mg/L στο 2% του ζ.β./ημέρα έως 3,41 mg/L στο 7% του ζ.β./ημέρα παρουσιάζοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Αντίστοιχα, η απορρόφηση των νιτρικών ιόντων (NO_3^- retained) από τα φυτά μαρουλιού παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές στο 2% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα.

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταχείριση 5% ζ.β./ημέρα, η οποία παρουσίασε σημαντικό ρυθμό παραγωγής αμμωνίας και απορρόφηση των νιτρικών ιόντων από τα φυτά. Συνεπώς, η καλύτερη ανάπτυξη των φυτών πραγματοποιήθηκε στη μεταχείριση 5% του ζ.β./ημέρα υποδηλώνοντας καλύτερη αξιοποίηση των νιτρικών ιόντων από τα φυτά συγκριτικά με τη μεταχείριση 7% του ζ.β./ημέρα η οποία παρείχε με περισσότερα αζωτούχα το σύστημα ενυδρειοπονίας.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδρειοπονία, κυπρίνος, μαρούλι, επίπεδο διατροφής, P_{TAN} , νιτρικά ιόντα.

ABSTRACT

The present study, investigated the effect of three different nutrient levels (2 % of b.w/day, 5 % of b.w/day and 7 % of b.w/day) on carp (*Cyprinus carpio*) in a aquaponic system using the RAFT (floating raft method) method co-cultured with lettuce (*Lactuca sativa*). The results showed that an increase in feeding rate was accompanied by a significant increase in water ammonia production (P_{TAN}), indicating an increased production of metabolic waste. P_{TAN} ranged from 0.15 mg/L at 2% of b.w/day to 3.41 mg/L at 7% of b.w/day and showed statistically significant differences between treatments.

The uptake of nitrate ions (NO_3^-) by lettuce plants also showed higher values at 2 % of body weight/day and 7 % of body weight/day. 5% of b.w/day treatment, showed a significant rate of ammonia production and nitrate ion uptake by the plants. Consequently, the best plant growth was achieved in the 5 % of b.w/day treatment, indicating a better utilisation of nitrate ions by the plants compared to the 7 % of b.w/day treatment, which applied more nitrogen to the aquaponic system.

Key-words: Aquaponics, common carp, lettuce, feeding level, P_{TAN} , nitrate io

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1. Οικοφυσιολογία και αρχές καλλιέργειας του κυπρίνου	10
1.2. Η χρήση του κυπρίνου στα συστήματα ενυδρείοπονίας.....	12
1.3.Ανάπτυξη κυπρίνου σε συστήματα ενυδρείοπονίας.....	15
1.4. Αναλογίες σίτισης και η επίδρασή τους στην ανάπτυξη του κυπρίνου	17
1.5. Σκοπός διπλωματικής μεταπτυχιακής διατριβής	19
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	20
2.1 Προμήθεια ιχθυδίων κυπρίνου (<i>Cyprinos carpio</i>) και φυτών μαρουλιού (<i>Lactuca sativa</i>) - εγκλιματισμός στις συνθήκες πειραματικής καλλιέργειας.....	20
2.2. Διαχείριση και εγκλιματισμός ιχθυδίων κυπρίνου	20
2.3. Διαχείριση και εγκλιματισμός φυτών μαρουλιού	21
2.4. Περιγραφή συστήματος ενυδρείοπονίας-Συνθήκες εκτροφής-Διαχείριση συστήματος	22
2.5. Πειραματικό πρωτόκολλο ανάπτυξης κυπρίνου και μαρουλιού	24
2.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων ενυδρείοπονίας.....	25
2.6.1. Βύθισμα αντλίας ενυδρείοπονικών συστημάτων.....	25
2.6.2. Παροχή νερού και ροή αέρα.	26
2.6.3. Φωτισμός συστημάτων ενυδρείοπονίας	27
2.7. Μετρήσεις βιομετρικών χαρακτηριστικών κυπρίνου	28
2.8. Μετρήσεις μορφομετρικών χαρακτηριστικών μαρουλιού	29
2.9. Μετρήσεις αβιοτικών παραγόντων	30
2.9.1. Προσδιορισμός ολικής αμμωνίας TAN	31

2.9.2. Προσδιορισμός νιτρωδών ιόντων (NO_2^-).....	31
2.9.3. Προσδιορισμός νιτρικών ιόντων (NO_3^-).....	32
2.9.4. Προσδιορισμός φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-})	33
2.9.5. Μετρήσεις pH	33
2.10. Δείκτες ανάπτυξης κυπρίνου και μαρουλιού	33
2.11. Δείκτες απόδοσης φίλτρου ενυδρείοπονικών συστημάτων.....	35
2.12. Στατιστική ανάλυση.....	36
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	37
3.1. Αβιοτικοί παράγοντες	37
3.2. Βιοτικοί Παράγοντες	39
3.3. Δείκτες αξιολόγησης και εκμετάλλευσης της τροφής	41
3.4. Δείκτες ανάπτυξης του μαρουλιού	44
3.5. Παράμετροι απόδοσης του φίλτρου.....	45
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	46
4.1 Αβιοτικοί παράγοντες	46
4.2. Βιοτικοί Παράγοντες	48
4.3. Δείκτες αξιολόγησης και εκμετάλλευσης της τροφής	50
4.4. Δείκτες ανάπτυξης μαρουλιού	51
4.5. Παράμετροι απόδοσης του φίλτρου.....	52
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	56
6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	56
6.2.Ελληνική Βιβλιογραφία.....	62

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Οικοφυσιολογία και αρχές καλλιέργειας του κυπρίνου

Ο κοινός κυπρίνος, *Cyprinus carpio* (*C. carpio*), αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως εκτρεφόμενα είδη γλυκού νερού παγκοσμίως, αναγνωρισμένος για την ικανότητά του να προσαρμόζεται σε ποικίλα περιβάλλοντα και για τον σημαντικό του ρόλο στην υδατοκαλλιέργεια και την αλιεία. Ανήκει στην οικογένεια Cyprinidae, η οποία περιλαμβάνει επτά υποοικογένειες με περίπου 220 γένη, που περιλαμβάνουν 20.000 είδη (Hussein et al., 2020). Η ανάπτυξη του *C. carpio* αποτελεί καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει τη βιωσιμότητα και τη διαχείριση της καλλιέργειας εκτροφής και του περιβάλλοντος εκτροφής του κυπρίνου.

Τα τελευταία χρόνια, η υδατοκαλλιέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο έχει σημειώσει σημαντική και ραγδαία ανάπτυξη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί κυρίως σε μια σειρά καινοτομιών που έχουν βελτιώσει τον έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας και την ανταγωνιστικότητα. Αυτές οι καινοτομίες περιλαμβάνουν διάφορες μορφές, όπως πρωτοποριακές ιδέες και την εφαρμογή γνώσεων που έχουν προσαρμοστεί από τα συστήματα παραγωγής τροφίμων στην ξηρά. Το 98,5% της παγκόσμιας παραγωγής του κυπρίνου προέρχεται από την υδατοκαλλιέργεια εσωτερικών υδάτων (El-Hack et al., 2022). Στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα ψάρια συνεισφέρουν περίπου το 30% της συνολικής κατά κεφαλήν κατανάλωσης ζωικών πρωτεϊνών (Wang et al., 2015).

Επιπλέον, η κυρίαρχη πρακτική στην υδατοκαλλιέργεια γλυκού νερού περιλαμβάνει την πολυκαλλιέργεια των κυριότερων ειδών κυπρίνου όπως για παράδειγμα του κοινού κυπρίνου, του ασημένιου κυπρίνου, του κατοπτρικού κυπρίνου και του φυτοφάγου κυπρίνου (Dessai et al. 2009, 2013, Taher et al., 2023, Tasleem et al., 2024), και αντιπροσωπεύει το 60% της συνολικής παραγωγής της υδατοκαλλιέργειας στο γλυκό νερό (Εικ.1). Το 17% της παραγωγής του κυπρίνου, προέρχεται από την Αίγυπτο που κατέχει τη δεύτερη θέση, μετά την παραγωγή τιλάπιας (Tasleem et al., 2024). Τα καλλιεργούμενα είδη κυπρίνου περιλαμβάνουν τον κοινό κυπρίνο (*Cyprinus carpio* L. 1758), τον ασημένιο κυπρίνο (*Hypophthalmichthys molitrix*, Valenciennes, 1844) και το φυτοφάγο κυπρίνο (*Ctenopharyngodon idella*, Steindachner, 1866) (Nuwansi et al., 2020).

Στις χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, όπως η Κίνα, οι κυπρίνοι κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα είδη που είναι γνωστά ως "κινέζικοι κυπρίνοι", και ανήκουν τα παρακάτω είδη, ο χορτοφάγος κυπρίνος (*Ctenopharyngodon idella*), ο ασημένιος κυπρίνος (*Hypophthalmichthys molitrix*) και ο μεγαλοκέφαλος κυπρίνος (*Aristichthys nobilis*). Η δεύτερη κατηγορία αφορά τους "κυπρίνους της Ινδίας", οι οποίοι περιλαμβάνουν τα είδη *Catla catla* (catla), *Labeo rohita* (rohu), *Cirrhinus mrigala* (mrigal) και *Cyprinus carpio* (κοινός κυπρίνος) (Tasleem et al., 2024).



Εικόνα 1. Παγκόσμια παραγωγή του κοινού κυπρίνου κατά τα έτη 2017-2020 (Πηγή: Tasleem et al., 2024)

Στην υδατοκαλλιέργεια, η αποδοτικότητα αξιοποίησης της τροφής είναι υψίστης σημασίας. Τα ψάρια είναι ποικιλόθερμοι οργανισμοί, γεγονός που σημαίνει ότι ο μεταβολισμός τους επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διατροφή τους. Η κατανόηση των βέλτιστων συνθηκών διατροφής του κυπρίνου (*C. Carpio*) οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης της ανάπτυξης, στη μειωμένη σπατάλη τροφής και αυξάνει τα οικονομικά οφέλη των μονάδων υδατοκαλλιέργειας.

Ο κοινός κυπρίνος (*Cyprinus carpio*) είναι ένα ευρέως καλλιεργούμενο είδος ψαριού του γλυκού νερού, το οποίο έχει σημαντική σημασία στην υδατοκαλλιέργεια παγκοσμίως (Taher et al., 2023). Η παραγωγή του κοινού κυπρίνου αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέρος της παραγωγής της υδατοκαλλιέργειας του γλυκού νερού σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες (Taher et al., 2023). Σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες, ο κοινός κυπρίνος αντιπροσωπεύει πάνω από το 80% της συνολικής παραγωγής ψαριών (Rahman, 2015).

Είναι παμφάγο είδος, γεγονός που του επιτρέπει να αξιοποιεί αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα διατροφικών πηγών (Kovalanko & Krasilnikova 2021). Η παροχή μιας ισορροπημένης διαίτας είναι υψίστης σημασίας για τη καλύτερη ανάπτυξη και την ευζωία του κυπρίνου. Η προσεκτική παρακολούθηση των δεικτών μετατροπής της τροφής μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διατροφής του κυπρίνου.

Η διατήρηση της βέλτιστης ποιότητας του νερού είναι υψίστης σημασίας στην καλλιέργεια του κυπρίνου στην ενυδρείοπονία, εξασφαλίζοντας ένα υγιές περιβάλλον τόσο για τα ψάρια όσο και για τα φυτά. Ο σχεδιασμός ενός ενυδρείοπονικού συστήματος συμβάλλει σημαντικά στην επιτυχή έκβαση της καλλιέργειας του κυπρίνου.

Μταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη του κυπρίνου, οι δείκτες διατροφής αποτελούν τον κρίσιμο καθοριστικό παράγοντα μιας και αναφέρονται στην αναλογία τροφής που παρέχεται στους εκτρεφόμενους οργανισμούς σε σχέση με τη βιομάζα τους και είναι απαραίτητοι για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού ανάπτυξης, του συντελεστή μετατροπής τροφής (FCR) και της συνολικής υγείας των ψαριών. Προηγούμενες μελέτες (Nuwansi et al. 2020) έχουν διερευνήσει τη σχέση μεταξύ των δεικτών σίτισης και της ανάπτυξης του κοινού κυπρίνου (*C. Carpio*), υποδεικνύοντας ότι τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητα της τροφής, καθώς και ο χρόνος και η συχνότητα σίτισης, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των αναπτυξιακών παραμέτρων.

1.2. Η χρήση του κυπρίνου στα συστήματα ενυδρείοπονίας

Στην Ενυδρείοπονία, ο κυπρίνος μπορεί να μετατρέψει αποτελεσματικά την τροφή σε βιομάζα, ενώ ταυτόχρονα παράγει απόβλητα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λίπανση των φυτών. Η παρούσα ολοκληρωμένη προσέγγιση ενισχύει τη βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής τροφίμων (Rahmat & Nazir, 2020). Η ενυδρείοπονία ως ένα σύστημα ολοκληρωμένης προσέγγισης είναι μια πολλά υποσχόμενη διαδικασία καλλιέργειας που συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Rackocy et al., 2006, Ghamkhar et al., 2019).

Μια βασική σκέψη στην ενυδρείοπονία είναι η εξισορρόπηση της αναλογίας παροχής της τροφής με τις απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά συστατικά. Μελέτες δείχνουν ότι ένα ποσοστό σίτισης της τάξης του 4% του ζ.β./ημέρα των ψαριών είναι

αποτελεσματικό για τον κοινό κυπρίνο σε εκτατικά συστήματα εκτροφής (Taher et al., 2023), το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί στα συστήματα ενυδρείοπονίας για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης των φυτών. Η παρακολούθηση των παραμέτρων της ποιότητας του νερού, όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και τα επίπεδα των θρεπτικών συστατικών, είναι επίσης ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση ενός υγιούς περιβάλλοντος διαχείρισης των συστημάτων ενυδρείοπονίας (Chakrabarti & Jana, 1991).

Για την καλλιέργεια του κυπρίνου χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ενυδρείοπονικών συστημάτων, όπως η μέθοδος καλλιέργειας σε επιπλέουσα σχεδία (raft system) (Du et al., 2006, Dragomir & Doltu, 2022), η τεχνική του θρεπτικού υποστρώματος (NFT) και η μέθοδος χρησιμοποίησης αδρανών υλικών πλήρωσης όπως η άργιλος τύπου LECCA. Τα συστήματα DWC, όπου τα φυτά καλλιεργούνται με τις ρίζες τους να αιωρούνται στο νερό πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, είναι κατάλληλα για την καλλιέργεια φυλλώδη πράσινων λαχανικών (Dragomir & Doltu, 2022). Η πυκνότητα εκτροφής του κυπρίνου στο σύστημα ενυδρείοπονίας θα πρέπει επίσης να διερευνηθεί εκτεταμένα μιας και σύμφωνα με μελέτες (Bordignon, 2020) επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος ενυδρείοπονίας καθώς και η παραγωγικότητά του.

Οι υψηλές πυκνότητες εκτροφής επηρεάζουν την ανάπτυξη, την υγεία και την ευημερία των ψαριών, συγκριτικά με τις μικρότερες πυκνότητες εκτροφής οι οποίες πιθανά να μην παρέχουν αρκετή ποσότητα θρεπτικών συστατικών κατάλληλα για την ανάπτυξη των φυτών (Bordignon, 2020).

Συνολικά, ο κοινός κυπρίνος αποτελεί μια κατάλληλη επιλογή για τα συστήματα ενυδρείοπονίας, προσφέροντας μια πηγή πρωτεΐνης από πλευράς ψαριού καθώς και πολύτιμα θρεπτικά συστατικά χρήσιμα για την παραγωγή των φυτών. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση των στρατηγικών διατροφής, το σχεδιασμό των συστημάτων εκτροφής και των ιχθυοπυκνοτήτων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα, η παραγωγή και η βιωσιμότητα των συστημάτων εκτροφής του κυπρίνου (Mihály-Karnai et al., 2025). Η ενυδρείοπονία αποτελεί μια βιώσιμη ενσωμάτωση της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, μιας και αξιοποιεί την αμοιβαία και επωφελή σχέση μεταξύ ψαριών και φυτών (Hussein et al., 2020). Οι κυπρίνοι, αναγνωρίζονται ως ψάρια οικολογικής μηχανικής, επηρεάζοντας σημαντικά τα υδάτινα περιβάλλοντα (Rahman, 2015). Τα συστήματα ενυδρείοπονίας βελτιώνουν την ποιότητα του νερού όπου, διαμέσου των ριζών απορροφούνται θρεπτικά κατάλληλα για να ανάπτυξη των φυτών και μέσω τις αποικίες των βακτηρίων τα αζωτούχα

παράγωγα οξειδώνονται σε νιτρικά ιόντα τα οποία χρησιμοποιούνται από τα φυτά για τη θρέψη τους (Hussein et al., 2020).

Η επιλογή των ειδών των ψαριών και των φυτών παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενυδραιοπονία (Nuwansi et al., 2020). Ο κυπρίνος εξαιτίας των διατροφικών του συνθηκών (παμφάγα ψάρια), τα οποία αξιοποιεί αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα πηγών διατροφής, συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών πηγών πρωτεϊνών. Η διατροφική ευελιξία που επιδεικνύει είναι ιδιαίτερα επωφελής στην ενυδραιοπονία, μιας και τόσο τα υποπροϊόντα όσο και τα απόβλητα ανακυκλώνονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τροφή για τα φυτά, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος της παραγωγικής διαδικασίας.

Επιπλέον, η ανθεκτικότητα που παρουσιάζει ο κυπρίνος στις περιβαλλοντικές συνθήκες, (ποιότητα νερού, θερμοκρασία), τον καθιστούν μια πολύ καλή επιλογή για τα συστήματα ενυδραιοπονίας ανά τον κόσμο. Η αυξανόμενη ζήτηση για τα εκτρεφόμενα είδη του κυπρίνου προέρχεται από την υψηλή εμπορική του αξία (Dawood & Koshio, 2015). Παράλληλα, η επιλογή των φυτών θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αγοράς ως προς τη ζήτηση, τη θρεπτική αξία και την καταλληλότητα του συστήματος ενυδραιοπονίας.

Η ενυδραιοπονία από πλευράς μηχανικής είναι μια πρακτική καλλιέργειας αποδοτική εξαιτίας των πόρων νερού που διαχειρίζεται και χρησιμοποιεί και λόγω της οικολογικής προσέγγισης που πραγματοποιεί δημιουργώντας μια φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση (Nuwansi et al., 2020). Τα ολοκληρωμένα συστήματα ενυδραιοπονίας αποτελούν μια αξιοσημείωτη στρατηγική για τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, ωστόσο η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος συνεχίζει να είναι πρωταρχικής σημασίας ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος.

Παράγοντες όπως η πυκνότητα εκτροφής, η χωροθέτηση των φυτών, η ισορροπία των θρεπτικών συστατικών και η διαχείριση του νερού χρειάζονται προσεκτική ρύθμιση προκειμένου να διασφαλιστεί η απόδοση του συστήματος και προϋποθέτουν περαιτέρω διερεύνηση τόσο ως προς την ισορροπία των συστημάτων όσο και ως προς την δυνατότητα αύξησης της απόδοσης (Somerville et al., 2014, Bosma et al., 2017, Estim et al., 2020).

Η ενυδραιοπονία προσφέρει μια βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων συγκριτικά με τα συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας (Zainal et al., 2021). Τα νιτροποιητικά βακτήρια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα ενυδραιοπονικά συστήματα

μετατρέποντας τα επιβλαβή απόβλητα των ψαριών, όπως την αμμωνία, σε θρεπτικά νιτρικά ιόντα κατάλληλα για τα φυτά (Xu et al., 2022).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ψαριών, φυτών και βακτηρίων είναι πολύπλοκη διαδικασία και συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του νερού (Stathopoulou et al., 2018). Τα απόβλητα των ψαριών που προέρχονται από τις βιοχημικές μεταβολικές διαδικασίες μειώνουν την ανάγκη χρήσης συνθετικών λιπασμάτων σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας. Η ενυδρείοπονία αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα παραγωγής τροφίμων, όπου τα απόβλητα των ψαριών προμηθεύουν με τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά τα φυτά. Τα φυτά διαμέσου της προσφορητικής τους ικανότητας που διαθέτουν αξιοποιούν τα παραγόμενα θρεπτικά, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα σύστημα κυκλικής οικονομίας (μέσω της αξιοποίησης των αποβλήτων) που συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθιστώντας το αποτελεσματικό ως προς της διαχείριση και αποτελεσματικότητα των πόρων.

1.3.Ανάπτυξη κυπρίνου σε συστήματα ενυδρείοπονίας

Η ανάπτυξη του κυπρίνου (*C. carpio*) σε συστήματα ενυδρείοπονίας επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως η ποιότητα του νερού, η πυκνότητα εκτροφής και οι πρακτικές χορήγησης τροφής. Σύμφωνα με τους Timmons και Ebeling (2010), οι βέλτιστες τιμές φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, pH, διαλυμένο οξυγόνο), είναι κρίσιμες για τη μέγιστη ανάπτυξη των ψαριών. Επιπλέον, η θρεπτική σύσταση της τροφής διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην ευζωία των ιχθύων. Μελέτες έχουν δείξει ότι η περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη και λιπίδια, καθώς και η παρουσία απαραίτητων βιταμινών και ιχνοστοιχείων, επηρεάζουν άμεσα τους ρυθμούς ανάπτυξης και τη συνολική φυσιολογική κατάσταση των ψαριών (Wu et al. 2020).

Οι δείκτες σίτισης, οι οποίοι καθορίζουν την ποσότητα και τη συχνότητα παροχής τροφής, παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στα συστήματα ενυδρείοπονίας. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι, η εφαρμογή μιας βέλτιστης στρατηγικής σίτισης ενισχύει την αναπτυξιακή απόδοση, περιορίζοντας παράλληλα την παραγωγή αποβλήτων, γεγονός που είναι καθοριστικό για τη διατήρηση της ποιότητας του νερού στα συστήματα ενυδρείοπονίας (Wu et al. 2020). Σύμφωνα με τους Taher et al., (2023) η προσαρμογή των δεικτών σίτισης ανάλογα με το μέγεθος και το στάδιο

ανάπτυξης του ψαριού βελτίωσε τους δείκτες μετατρεψιμότητας της τροφής καθώς και το ρυθμό ανάπτυξης του κυπρίνου (*C. Carpio*).

Στην υδατοκαλλιέργεια, είναι πιθανό να αυξηθεί η τοξικότητα του νερού εκτροφής, στην περίπτωση όπου τα απόβλητα των εκτρεφόμενων ζώων συσσωρευθούν σε μεγάλο βαθμό. Αντίθετα, σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας τα θρεπτικά συστατικά αζωτούχας προέλευσης, υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό με την μορφή αμμωνίας, τα οποία οξειδώνονται διαμέσου της βιοχημικής διεργασίας της νιτροποίησης σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα και στη συνέχεια εξαιτίας της αναγωγικής διεργασίας της απονιτροποίησης σε άζωτο.

Μετά την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά, το νερό ανακυκλώνεται και επιστρέφει στις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών. Η ανακυκλοφορία του νερού, διασφαλίζει την ισορροπία του συστήματος, παρέχοντας διαλυμένο οξυγόνο στις δεξαμενές εκτροφής που το απαρτίζουν. Επιπλέον, έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών καθιστώντας το νερό κατάλληλο για την υγιή ανάπτυξη των φυτών και των εκτρεφόμενων ειδών των ψαριών.

Οι Vlahos et al. (2019) αναφέρουν ότι, το ποσοστό του όγκου του νερού που επανακυκλοφορεί σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας γλυκού ή υφάλμυρου νερού, είναι της τάξης του 90% και ρέει στα υδροπονικά υποσυστήματα ανάπτυξης των φυτών ενώ το 10% ρέει προς τις δεξαμενές εκτροφής των ιχθύων δημιουργώντας ανανέωση του νερού της τάξης του 10%.

Μέσω της λειτουργίας των συστημάτων ενυδρείοπονίας, προωθείται μια αειφορική μέθοδος παραγωγής οικολογικών τροφίμων χωρίς τη χρήση χημικών λιπασμάτων ή την απόρριψη μεγάλου όγκου νερού στο φυσικό περιβάλλον. Ο συνδυασμός της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας έχει ως στόχο τη διαχείριση των περιβαλλοντικών πιέσεων, την ορθολογική χρήση των υδάτινων πόρων, τη βελτίωση της εδαφικής γονιμότητας και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. (Adhikari et al., 2020, Somerville et al. 2014).

Η συγκαλλιέργεια του κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) και του μαρουλιού (*Lactuca sativa*) αποτελεί μια πρόκληση για τα συστήματα ενυδρείοπονίας εξαιτίας της ικανοποιητικής απόδοσης που παρουσιάζουν και τα δυο είδη. Το μαρούλι (*L. Sativa*) για παράδειγμα αποτελεί ένα ταχέως αναπτυσσόμενο φυλλώδες λαχανικό, το οποίο ευδοκιμεί σε θρεπτικά πλούσια νερά, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για παραγωγή στα συστήματα ενυδρείοπονίας. Οι Al-Humairi et al., (2020) και Aljehani et al. (2023) αναφέρουν ότι, τα οφέλη της συγκαλλιέργειας ψαριών και φυτών, είναι η παραγωγή των

θρεπτικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ τα φυτά συμβάλλουν στον καθαρισμό του νερού, δημιουργώντας ένα ισορροπημένο οικοσύστημα.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δεικτών σίτισης των ψαριών και της ανάπτυξης των φυτών αποτελεί κρίσιμο πεδίο μελέτης. Μελέτες αναφέρουν ότι, τα απόβλητα των ψαριών επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη όσο και τη διατροφική ποιότητα του μαρουλιού (*L. Sativa*) (Maucieri et al., 2018). Για παράδειγμα, όταν τα ψάρια σιτίζονται με δίαιτες υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη, τα παραγόμενα απόβλητα παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα αζώτου, γεγονός που ενισχύει την ανάπτυξη του μαρουλιού, *L. sativa* (Maucieri et al., 2018). Αντίθετα, ένας μη ισορροπημένος δείκτης σίτισης μπορεί να οδηγήσει είτε σε έλλειψη είτε σε υπερβολική συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, επηρεάζοντας αρνητικά την ανάπτυξη τόσο των ιχθύων όσο και των φυτών.

1.4. Αναλογίες σίτισης και η επίδρασή τους στην ανάπτυξη του κυπρίνου

Η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών σίτισης και της ανάπτυξης στα συστήματα ενυδρείοπονίας έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς ερευνητικής δραστηριότητας (Πιν.1). Οι Al-Musawi et al., (2023) υπογράμμισαν τη σημασία της ακριβούς διαμόρφωσης του ποσοστού σίτισης, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη αύξηση των ψαριών, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται η περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή αποβλήτων. Η υπερβολική παροχή της τροφής συνδέεται με την αυξημένη παραγωγή οργανικών φορτίων, γεγονός που μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα του νερού και να επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών που συγκαλλιεργούνται στο σύστημα. Αντιστρόφως, η ανεπαρκής σίτιση ενδέχεται να οδηγήσει σε υποδεέστερους ρυθμούς ανάπτυξης των ψαριών, επηρεάζοντας δυσμενώς τη συνολική παραγωγικότητα του συστήματος.

Επιπρόσθετα, οι Mihaly-Karnai et al., (2025) αναφέρουν ότι, ποσοστό σίτισης της τάξης του 1,5% έως 2% του ζ.β/ημέρα είναι επαρκής για τη μεγιστοποίηση των ρυθμών αύξησης του κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), ενώ διατηρούνται σταθερές οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού σε επίπεδα που είναι ευνοϊκά για την ανάπτυξη του μαρουλιού (*Lactuca sativa*). Επίσης, τα ευρήματα της μελέτης των Al-Humairi et al., (2020), αναφέρουν ότι, η τροποποίηση του ποσοστού σίτισης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το μέγεθος των ιχθύων όσο και τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες οι οποίες οδηγούν στη βέλτιστη ανάπτυξη του κυπρίνου και του μαρουλιού.

Πίνακας 1. Ποσοστά επιπέδων διατροφής σε διάφορα είδη ψαριών

Είδη ψαριών	% ζ.β /day	Ανάπτυξη	Πηγή
Κοινός κυπρίνος	2%, 3%, 4%	καλύτερη αύξηση στο 4% του ζ.β/day	(Taher et al., 2023)
Κοινός κυπρίνος	4-7%	Βέλτιστο FCR στο 4%	(Cordeli et al., 2021)
Nile Tilapia	5% and 20%	Καλύτερο SGR στο 5%	(Dessai & Singh (2009)
African Giant Catfish	4%, 6%, 8% and 10%	SGR ήταν στατιστικά μεγαλύτερο στο 4.0% σε σχέση με το 10.0%	(Al-Musawi et al., 2023)
Κοινός κυπρίνος	1,5% έως 2%	Επαρκής αύξηση σωματικού βάρους	Mihaly-Kurnai et al., (2025)

Σημαντικό ρόλο επίσης, παίζει η συχνότητα παροχής της τροφής. Η μελέτη των Bararri et al., (2016) έδειξε ότι, η παροχή πολλών μικρών γευμάτων στη διάρκεια της ημέρας συνέβαλε στην αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των ψαριών συγκριτικά με τη χορήγηση ενός γεύματος στη διάρκεια της ημέρας. Η προσέγγιση αυτή φαίνεται να ευνοεί την αποδοτικότερη αξιοποίηση της τροφής και να περιορίζει την παραγωγή των αποβλήτων, ενισχύοντας τη λειτουργική σταθερότητα και τη συνολική οικολογική ισορροπία του συστήματος ενυδρείοπονίας (Du et al., 2006).

Η ποσότητα της τροφής που παρέχεται στα ψάρια, εκφρασμένη ως ποσοστό του σωματικού τους βάρους, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξης, τη μετατρεψιμότητα της τροφής (FCR) και τη συνολική αποδοτικότητα της παραγωγής. Ο δείκτης σίτισης θα πρέπει να ρυθμίζεται με ακρίβεια, ώστε να διασφαλίζεται η επαρκής θρεπτική υποστήριξη της αύξησης των ψαριών, αποφεύγοντας παράλληλα την υπερκατανάλωση της τροφής (υπερσιτισμός), η οποία μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση των αποβλήτων, να υποβαθμίσει την ποιότητα του νερού και το κόστος παραγωγής (Taher et al., 2023).

Το ισορροπημένο σιτηρέσιο διασφαλίζει την αποτελεσματική αξιοποίηση της τροφής και ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας. Ο δείκτης σίτισης επηρεάζει άμεσα το ρυθμό ανάπτυξης των ιχθύων, γεγονός που συνεπάγεται άμεση επίδραση της παραγωγικής δυναμικής της εκτροφής: όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός ανάπτυξης, τόσο μεγαλύτερο είναι το οικονομικό όφελος και η δυνατότητα παραγωγής περισσότερων ψαριών προς διάθεση στην αγορά.

Η επιλογή των επιπέδων διατροφής στην παρούσα μελέτη (2% του ζ.β/ημέρα, 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα, Πιν.1) έγινε με βάση το ποσοστό που θα οδηγήσει στη βέλτιστη ανάπτυξη του κυπρίνου καθώς και του μαρουλιού όπως

αναφέρεται σε προηγούμενες μελέτες (Cordeli et al., 2021, Taher et al. 2023, Al-Musawi et al., 2023). Συνεπώς το επίπεδο διατροφής στο 2% του ζ.β/ημέρα είναι επαρκές για να επιφέρει ικανοποιητική ανάπτυξη στον κοινό κυπρίνο και χρησιμοποιήθηκε ως το ελάχιστο ποσοστό σίτισης (Mihaly-Kurnai et al., 2025). Το επίπεδο 5% του ζ.β/ημέρα φαίνεται να επιτυγχάνει το βέλτιστο SGR σε θερμόφιλα είδη όπως η Nile Tilapia (Dessai & Singh, 2009) και επιλέχθηκε ως το βέλτιστο ποσοστό σίτισης που θα επιφέρει τη βέλτιστη ανάπτυξη στον κοινό κυπρίνο και στο μαρούλι (Taher et al., 2023). Τέλος το ποσοστό 7% του ζ.β/ημέρα επιλέχθηκε ως το μέγιστο ποσοστό σίτισης, όπου σύμφωνα με μελέτες ενδέχεται να οδηγεί σε σπατάλη τροφής (υψηλή τιμή FCR) και υποβάθμιση των συνθηκών εκτροφής (Cordeli et al., 2021),.

1.5. Σκοπός διπλωματικής μεταπτυχιακής διατριβής

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει την επίδραση τριών διαφορετικών επιπέδων σίτισης (2% του ζ.β ιχθύος/ημέρα, 5% του ζ.β ιχθύος /ημέρα και 7% του ζ.β ιχθύος ημέρα) στην αναπτυξιακή και επιβίωση του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) και του μαρουλιού (*Lactuca sativa*) στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου συστήματος ενυδρείοπονίας, το οποίο χρησιμοποιεί ως μέθοδο την σχεδία επίπλευσης (raft methods).

Ειδικότερα, η παρούσα μελέτη αποσκοπεί να αναλύσει και να αποτιμήσει τη συσχέτιση του ρυθμού ανάπτυξης κυπρίνου και μαρουλιού σε σχέση με το ποσοστό χορήγησης τροφής, επιχειρώντας να προσδιοριστεί το βέλτιστο επίπεδο διατροφής που μεγιστοποιεί την παραγωγικότητα του συστήματος, ενισχύοντας τόσο τη βιομάζα των ιχθύων όσο και την ανάπτυξη του φυτού.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Προμήθεια ιχθυδίων κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) και φυτών μαρουλιού (*Lactuca sativa*) - εγκλιματισμός στις συνθήκες πειραματικής καλλιέργειας.

Η πειραματική εκτροφή πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ενυδρείων του Τμήματος Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών, στο Μεσολόγγι. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 45 ημέρες. Τα ιχθύδια του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), με μέσο βάρος 2 gr προμηθεύτηκαν από τον Ιχθυογενετικό Σταθμό Άρτας τα οποία μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο σε ειδικά δοχεία μεταφοράς με συνεχή παροχή διαλυμένου οξυγόνου, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα των συνθηκών καθ' όλη τη μεταφορά των ψαριών.

Μετά την άφιξή τους, ακολούθησε ο εγκλιματισμός τους τόσο στο νέο περιβάλλον αιχμαλωσίας όσο και στις συνθήκες εκτροφής του πειράματος. Παράλληλα, τα ενυδρειοπονικά συστήματα τέθηκαν σε λειτουργία και ξεκίνησε η διαδικασία σταθεροποίησής τους. Τα μαρούλια (*Lactuca sativa*) προμηθεύτηκαν από τοπικό φυτώριο της περιοχής του Μεσολογγίου και εγκλιματίστηκαν στο εργαστήριο με την τοποθέτησή τους σε διάτρητα υδροπονικά δοχεία. Τα φυτά προσαρμόστηκαν στη θερμοκρασία του εργαστηρίου (19-20°C), ώστε να είναι κατάλληλα για εγκατάσταση στο υδροπονικό υποσύστημα τύπου raft που είχε διαμορφωθεί ειδικά για τις ανάγκες του πειράματος.

2.2. Διαχείριση και εγκλιματισμός ιχθυδίων κυπρίνου

Η προμήθεια των ιχθυδίων του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), έγινε τον από τον Ιχθυογεννητικό Σταθμό Άρτας και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Ενυδρείων στο Μεσολόγγι. Η μεταφορά πραγματοποιήθηκε σε ειδικά δοχεία τα οποία πληρώθηκαν με γλυκό νερό, με συνεχή παροχή αέρα μέσω αεραντλίας, ώστε να διασφαλισθεί η μεταφορά τους και να αποφευχθούν προβλήματα θνησιμότητας. Οι κυπρίνοι κατά τη μεταφορά τους στο εργαστήριο προκειμένου να περιοριστεί η επιβάρυνση του νερού με αμμωνία παρέμειναν σε αιτία για 24ωρες.

Με την άφιξή τους στο εργαστήριο, τα ιχθύδια του κυπρίνου αφέθηκαν να ηρεμήσουν παραμένοντας μέσα στο δοχείο μεταφοράς για περίπου μία ώρα προσθέτοντας συνεχόμενη παροχή αέρα. Στη συνέχεια, διαμοιράσθηκαν στα ενυδρεία υποδοχής χωρητικότητας 100 L, εξοπλισμένα με αεραντλία και βιολογικό φίλτρο, όπου παρέμειναν για περίπου 15 ημέρες προκειμένου να ολοκληρωθεί ο εγκλιματισμός τους στο νέο περιβάλλον.

Μετά την ολοκλήρωση της περιόδου προσαρμογής, επιλέχθηκαν 117 ιχθύδια για το πείραμα. Για τις μετρήσεις των βιομετρικών χαρακτηριστικών, τα ψάρια κατανεμήθηκαν σε μικρές ομάδες σε δοχείο με νερό βρύσης, στο οποίο είχε προστεθεί 0,25 mL/L φαινοξυαιθανόλη ως αναισθητικό. Η αναισθητοποίηση διήρκεσε περίπου 2 h. Στη συνέχεια, κάθε ιχθύδιο μετρήθηκε και ζυγίστηκε και προστέθηκε στις δεξαμενές εκτροφής ανάλογα με το σωματικό του βάρος, ώστε να εξασφαλιστεί ομοιογένεια μεταξύ των πειραματικών μεταχειρίσεων. Η ανάκτηση των αισθήσεων των ιχθυδίων έγινε με την προσθήκη των ψαριών σε κουβά με καθαρό φρέσκο νερό και πλούσιο οξυγόνο. Στη συνέχεια διαμοιράσθηκαν στα εννέα πειραματικά συστήματα (3 συστήματα ενυδρειοπονίας) ανά 13 άτομα ανά ενυδρείο (39 άτομα ανά μεταχείριση).

Καθ' όλη τη διάρκεια της φάσης του εγκλιματισμού, γίνονταν τακτικές μετρήσεις ποιότητας νερού, όπως θερμοκρασία, pH, αμμωνία, NO_2^- και NO_3^- , καθώς και παρακολούθηση του ρυθμού εξαίμησης προκειμένου να αναπληρώνεται ο όγκος του νερού που εξατμίζονταν. Η έναρξη της πειραματικής διαδικασίας ορίστηκε όταν καταγράφηκε σταθερή αύξηση των NO_3^- , που ήταν ένδειξη ενεργοποίησης του βιολογικού φίλτρου. Τα ιχθύδια σιτίζονταν μία φορά την ημέρα με εμπορική βυθιζόμενη τροφή σύμπηκτα (Ocean Nutrition), πλούσια σε πρωτεΐνη.

2.3. Διαχείριση και εγκλιματισμός φυτών μαρουλιού

Τα μαρούλια που χρησιμοποιήθηκαν στο ενυδρειοπονικό πείραμα βρίσκονταν στο βλαστικό στάδιο των νεαρών ατόμων 30 ημερών περίπου. Προμηθεύτηκαν από τοπικό φυτώριο στο Μεσολόγγι και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Ενυδρείων. Κατά το πρώτο 24ωρο παρέμειναν χωρίς να δεχτούν κάποια παρέμβαση, ώστε να προσαρμοστούν στη θερμοκρασία του εργαστηρίου, η οποία διατηρούνταν σταθερή στους 20 °C. Από τη δεύτερη ημέρα και στη συνέχεια, ποτίζονταν κάθε 3 ημέρες με

νερό προερχόμενο από ενυδρείο εκτροφής κυπρίνων, για να επιτευχθεί σταδιακή εξοικείωση με το σύστημα και τα θρεπτικά του χαρακτηριστικά πριν τη μεταφύτευσή τους στα υδροπονικά υποσυστήματα τύπου raft.

Η προσαρμογή των ιχθυδίων υπήρξε ομαλή, με τα ιχθύδια του κυπρίνου να έχουν πλήρως εγκλιματιστεί στο νέο περιβάλλον σε διάστημα 6–7 ημέρες, επιτρέποντας την έναρξη της δεύτερης φάσης του πειράματος, η οποία περιλάμβανε την εισαγωγή των φυτών στα συστήματα. Αρχικά, τα μαρούλια αφαιρέθηκαν προσεκτικά από τα αρχικά τους σπορεία μαζί με το χώμα. Οι ρίζες καθαρίστηκαν απαλά με νερό, ώστε να απομακρυνθεί πλήρως το υπόστρωμα και να αποφευχθεί οποιαδήποτε μόλυνση του συστήματος. Παράλληλα, αφαιρέθηκαν τυχόν ξηρά ή φθαρμένα φύλλα.

Ακολούθησαν βασικές μορφομετρικές μετρήσεις για κάθε φυτό, καταγράφοντας το συνολικό ύψος, το νωπό βάρος και τον αριθμό των φύλλων. Στη συνέχεια, τα φυτά τοποθετήθηκαν στα διάτρητα φυτοδοχεία, γεμισμένα με μείγμα από ελαφρόπετρα και άργιλο τύπου Lecca το οποίο διασφάλιζε σταθερότητα στο υπέργειο τμήμα του φυτού. Η απόσταση από φυτό σε φυτό διατηρήθηκε μεταξύ 15–25 cm, προκειμένου να αποφευχθεί ο ανταγωνισμός και να διευκολυνθεί η ανάπτυξή τους.

2.4. Περιγραφή συστήματος ενυδρειοπονίας-Συνθήκες εκτροφής-Διαχείριση συστήματος

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρία ανεξάρτητα ενυδρειοπονικά συστήματα τύπου raft με ανακύκλωση νερού μικρής εργαστηριακής κλίμακας, συνολικής χωρητικότητας 180 L το καθένα. Κάθε σύστημα αποτελούνταν από τρεις δεξαμενές εκτροφής ιχθύων και τρία υποσυστήματα υδροπονικής καλλιέργειας μαρουλιού, με αντίστοιχο όγκο νερού τύπου raft. Κάθε σύστημα υποστηρίζονταν από φίλτρο τύπου *sump* η ροή του οποίου ήταν καθοδική και συνέχεια γίνονταν ανοδική επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την καλύτερη κυκλοφορία των θρεπτικών συστατικών στο φίλτρο. Ο συνολικός ωφέλιμος όγκος ήταν 53,6 L.

Τα συστήματα τοποθετήθηκαν πάνω σε ανοξείδωτες μεταλλικές βάσεις επενδυμένες με φελιζόλ πάχους 10 cm, για προστασία από φθορές και απομόνωση κραδασμών. Η τοποθέτησή τους στους πάγκους, έγινε με τρόπο που να διασφάλιζε (Εικ. 3), την κυκλοφορία του νερού μέσω της βαρύτητας, δηλαδή το νερό κατευθύνονταν από το υψηλότερο σημείο (υδροπονικά υποσυστήματα) στο κατώτατο σημείο που

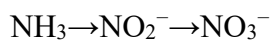
βρίσκονταν το φίλτρο τύπου *sump* με το ενδιάμεσο σημείο τη δεξαμενή εκτροφής των ιχθύων.



Εικόνα 3. Χωροταξική διάταξη των συστημάτων ενυδρειοπονίας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ενυδρειοπονικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα περιλάμβαναν τα εξής επιμέρους τμήματα:

- **Δεξαμενές εκτροφής ιχθύων:** διαστάσεις $40 \times 35 \times 26$ cm, πάχος τοιχωμάτων 8 mm και χωρητικότητα 36,4 L.
- **Υδροπονικά υποσυστήματα:** διαστάσεις $40 \times 35 \times 26$ cm και όγκο 36,4 L. Τοποθετήθηκαν στο ανώτερο επίπεδο κάθε ενυδρειοπονικού συστήματος για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των φυτών.
- **Φίλτρο τύπου sump:** διαστάσεις $72 \times 31 \times 40$ cm και συνολική χωρητικότητα 89,3 L. Το φίλτρο χωριζόταν σε τρία διακριτά τμήματα:
 - **Μηχανικό φίλτρο** (24,8 L): Περιείχε σφουγγάρι πάχους 15–20 cm και στρώση υαλοβάμβακα 5 cm για την κατακράτηση στερεών υλικών.
 - **Βιολογικό φίλτρο** (42,2 L): Περιλάμβανε 20 L βιοσφαίρες (διάμετρος 31,8–38,1 mm, ειδική επιφάνεια SSA ~ 800 m²/m³) και 40 L κεραμικό υλικό (διάμετρος 25 mm, SSA ~ 600 m²/m³), για την υποστήριξη της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης σύμφωνα με τη χημική μετατροπή:



- **Τμήμα αντλίας/αποθήκευσης** (22,28 L): Περιλάμβανε τη βυθιζόμενη αντλία Ocean Runner 1200, η οποία τροφοδοτούσε με 90% του νερού στις υδροπονικές δεξαμενές και το υπόλοιπο 10% στις δεξαμενές εκτροφής των ιχθύων. Το νερό σε αυτό το στάδιο ήταν απαλλαγμένο από αμμωνία και νιτρώδη ιόντα, ενώ είχε εμπλουτιστεί με νιτρικά ιόντα.
- **Φωτισμός:** Ρυθμίστηκε σταθερά στα $362.18 \pm 4.51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, εξασφαλίζοντας επαρκή ένταση για τη φωτοσύνθεση των φυτών μαρουλιού.

Η θερμοκρασία του νερού διατηρήθηκε σε σταθερά επίπεδα και διακυμάνθηκε από 19 έως 20 °C, ενώ το pH διακυμάνθηκε από 7,5 έως 8,5. Παράλληλα, η παροχή οξυγόνου εξασφαλίστηκε μέσω αεραντλίας σε κάθε σύστημα. Η διάχυση του αέρα επιτυγχανόταν με τη χρήση πορώδους πέτρας πωρόλιθου διαστάσεων $7 \times 3,5 \text{ cm}$, διατηρώντας τα επίπεδα κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου εντός του εύρους 85–95%.

2.5. Πειραματικό πρωτόκολλο ανάπτυξης κυπρίνου και μαρουλιού

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 117 άτομα κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), με μέσο αρχικό βάρος $3,63 \pm 1,13 \text{ gr}$ και μέσο αρχικό μήκος $6,2 \pm 1,41 \text{ cm}$. Τα ψάρια κατανεμήθηκαν στις τρεις μεταχειρίσεις ανά 39 άτομα ανά μεταχείριση ήτοι 13 άτομα ανά δεξαμενή εκτροφής.

Τα φυτά και τα ψάρια οργανώθηκαν στις τρεις διαφορετικές διατροφικές μεταχειρίσεις, με βάση το ημερήσιο επίπεδο διατροφής που παρέχονταν σε σχέση με το σωματικό βάρος του ψαριού:

- 2% ζ.β./ημέρα (χαμηλή μεταχείριση),
- 5% ζ.β./ημέρα (μέτρια μεταχείριση),
- 7% ζ.β./ημέρα (υψηλή μεταχείριση).

Η μέση τιμή 5% επιλέχθηκε, ως το ποσοστό που προάγει τη βέλτιστη ανάπτυξη του κοινού κυπρίνου (Taher et al., 2023). Αντίθετα, το 2% επιλέχθηκε ως η ελάχιστη

ημερήσια ποσότητα τροφής, ενώ το 7% ως η μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα σίτισης, με στόχο τη σύγκριση των δυο ακραίων τιμών.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 36 φυτά μαρουλιού (*Lactuca sativa*), με μέσο αρχικό ύψος $7,90 \pm 0,05$ cm (Μέσο $\pm$ Τυπικό Σφάλμα). Τα φυτά κατανεμήθηκαν στις υδροπονικές δεξαμενές τύπου raft σε ομάδες των 4 ανά δεξαμενή (Εικ. 4). Τα φυτά τοποθετήθηκαν μεμονωμένα σε διάτρητα πλαστικά δοχεία φύτευσης, στο οποίο είχε προστεθεί υπόστρωμα στήριξης από μείγμα διογκωμένου άργιλου τύπου LECA και ελαφρόπετρα.

Η τεχνική raft (σχεδία επίπλευσης) επιτρέπει την πλήρη εμβάπτιση του ριζικού συστήματος των φυτών στο θρεπτικό διάλυμα, διασφαλίζοντας τη συνεχόμενη πρόσληψη των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 4. Μαρούλια στο συστήματα ενυδρείοπονίας τύπου Raft (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

2.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων ενυδρείοπονίας

2.6.1. Βύθισμα αντλίας ενυδρείοπονικών συστημάτων

Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε στα ενυδρείοπονικά συστήματα ήταν βυθιζόμενη (OCEAN RUNNER 1200 L/h) και τοποθετήθηκε στο τρίτο και τελευταίο διαμέρισμα του φίλτρου *sump* (Εικ. 4). Το τμήμα αυτό λειτουργούσε ως χώρος συλλογής του πλήρως φιλτραρισμένου νερού απαλλαγμένου από αμμωνία και νιτρώδη ιόντα και εμπλουτισμένου με νιτρικά, πριν αυτό επανακυκλοφορήσει στο σύστημα.

Η αντλία ήταν πλήρως βυθισμένη στο νερό και τροφοδοτούσε το σύστημα με νερό (Εικ. 5). Το 80% του νερού κατευθυνόταν στις υδροπονικές δεξαμενές των φυτών, εξασφαλίζοντας συνεχή παροχή θρεπτικών στοιχείων στις υδροπονικές δεξαμενές, ενώ το υπόλοιπο 20% κατευθυνόταν στις δεξαμενές εκτροφής των ιχθύων, εξασφαλίζοντας την κυκλοφορία και την ανανέωση του νερού. Οι τεχνικές προδιαγραφές της βυθιζόμενης αντλίας Ocean runner-AQUMEDIQ, περιγράφονται παρακάτω

- Παροχή: **1.200 L/h**
- Μέγιστο μανομετρικό ύψος: **2 m**
- Κατανάλωση ισχύος: **25 Watt**



Εικόνα 5. Φίλτρο τύπου sump που χρησιμοποιήθηκε στα ενυδρειοπονικά συστήματα με ανακύκλωση νερού (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

2.6.2. Παροχή νερού και ροή αέρα.

Η συνεχής παροχή ατμοσφαιρικού αέρα στα ενυδρειοπονικά συστήματα γίνονταν μέσω της κεντρικής παροχής αέρα του εργαστηρίου. Η ροή που καταγράφηκε σε κάθε σύστημα ήταν της τάξης των $15,5 \pm 5,81 \text{ cm}^3/\text{sec}$, διασφαλίζοντας επαρκή αερισμό σε όλα τα πειραματικά συστήματα.

Η διάχυση του αέρα πραγματοποιούνταν μέσω αερόπετρας από πωρόλιθο, διαστάσεων $29 \times 23 \text{ mm}$, η οποία τοποθετήθηκε σε κατάλληλη θέση μέσα σε κάθε δεξαμενή. Η τοποθέτηση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή των φυσαλίδων, μεγιστοποιώντας τη διασπορά του αέρα στο νερό.

Η σταθερή και ομοιογενής διάχυση του αέρα συνέβαλε στη διατήρηση υψηλών επιπέδων κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου (DO), στοιχείο κρίσιμο για την καλύτερη λειτουργία του ενυδρειοπονικού συστήματος και τη διατήρηση της ευζωίας των ιχθύων.

2.6.3. Φωτισμός συστημάτων ενυδρείοπονίας

Ο φωτισμός αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη του μαρουλιού, καθώς μιας και επηρεάζει άμεσα τη φωτοσυνθετική του ικανότητα. Στο πλαίσιο του πειράματος, ο τεχνητός φωτισμός επιτεύχθηκε μέσω λαμπτήρων, τα οποία τοποθετήθηκαν στο ανώτερο τμήμα των υδροπονικών υποσυστημάτων, σε ύψος 30 cm από την επιφάνεια των δεξαμενών καλλιέργειας των φυτών (Εικ. 3).

Η φωτοπερίοδος ρυθμίστηκε σε 10 ώρες φωτός και 14 ώρες σκότους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του είδους *Lactuca sativa*. Παράλληλα, η ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (Photosynthetically Active Radiation - PAR) διατηρήθηκε σταθερή στα επίπεδα των $362.18 \pm 4.51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, σύμφωνα με τα δεδομένα που περιγράφονται από τους Tsoumalakou et al. (2023), καλύπτοντας επαρκώς τις ανάγκες των φυτών για φωτοσύνθεση.

2.7. Σιτηρέσιο και χορήγηση τροφής

Το πείραμα διήρκησε 45 ημέρες, κατά τη διάρκεια των οποίων χορηγήθηκε τροφή της εταιρείας Ocean Nutrition, ειδικά σχεδιασμένη για τη διατροφή του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*). Η επιλογή της συγκεκριμένης τροφής βασίστηκε στις διατροφικές απαιτήσεις του είδους, καθώς περιείχε όλα τα βασικά ανόργανα θρεπτικά συστατικά για την υποστήριξη της βέλτιστης ανάπτυξής του.

Η τροφή χαρακτηριζόταν από υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη (43,6%) και κατάλληλη αναλογία ολικών λιπιδίων (11,2%). Επιπλέον, περιείχε φυτικές ίνες 1,2%, υγρασία 15%, τέφρα 9% και φώσφορο 1%, καλύπτοντας πλήρως τις φυσιολογικές ανάγκες των ιχθύων. Η ημερήσια ποσότητα τροφής που δινόταν σε κάθε μεταχείριση (Εικ. 6) υπολογιζόταν βάσει του μέσου σωματικού βάρους κάθε ψαριού.

Η σίτιση πραγματοποιούνταν τρεις φορές την ημέρα, συγκεκριμένα:

- 09:00 π.μ.
- 13:00 μ.μ.
- 17:00 μ.μ.

Η τροφή χορηγούνταν με το χέρι, ενώ η ποσότητα ζυγιζόταν καθημερινά. Επιπλέον, η απαιτούμενη ημερήσια τροφή αναπροσαρμοζόταν ανά

15 ημέρες, βάσει των αλλαγών στο σωματικό βάρος των ψαριών. Ο υπολογισμός της νέας ποσότητας τροφής γινόταν με χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή του μέσου βάρους ανά μεταχείριση.

$$F = (\text{Βιομάζα} \times \text{ΕΔ}\%) / \text{αριθμός γευμάτων},$$

η βιομάζα των ιχθύων υπολογίζονταν από τον τύπο:

$\text{Βιομάζα} = \text{Αριθμός ιχθύων} \times \text{Μέσο βάρος (gr)}$ και ΕΔ είναι το επίπεδο διατροφής



Εικόνα 6. Ημερήσιο ζύγισμα τροφής της τροφής με ζυγαριά ακριβείας δυο δεκαδικών ψηφίων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

2.7. Μετρήσεις βιομετρικών χαρακτηριστικών κυπρίνου

Οι μετρήσεις των ιχθύων ξεκίνησαν την πρώτη ημέρα του πειράματος (D0) και επαναλαμβάνονταν κάθε 15 ημέρες. Οι παράμετροι που καταγράφονταν ήταν το ολικό μήκος (L, cm) και το ολικό βάρος (w, gr) των ιχθυδίων του κοινού κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) (Εικ. 8).

Πριν από κάθε διαδικασία μέτρησης προηγείτο 24ωρη περίοδος ασιτίας, με σκοπό την εκκένωση του πεπτικού σωλήνα και τη μείωση του στρες κατά τους χειρισμούς. Τα ψάρια συλλέγονταν από τις δεξαμενές και υποβάλλονταν σε αναισθησία με λουτρό φαινοξυαιθανόλης σε συγκέντρωση 0,25 mL/L για 2 h.

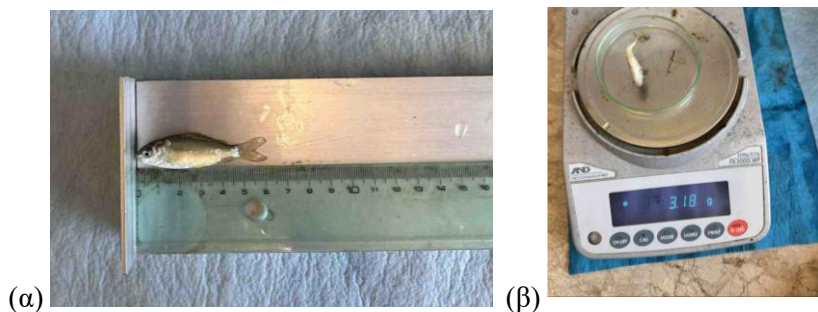
Για την καταγραφή του βάρους χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας (AND FX-3000i WP), με ακρίβεια στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο, ενώ το μήκος μετρήθηκε με ιχθυόμετρο (Εικ. 8). Κατά την προετοιμασία, τα ιχθύδια τοποθετούνταν

σε κουβά με περίπου 5 L νερό από τις πειραματικές δεξαμενές, εμπλουτισμένο με οξυγόνο, ώστε να διατηρηθούν οι φυσιολογικές συνθήκες.

Παράλληλα, σε ξεχωριστό δοχείο προετοιμαζόταν το αναισθητικό διάλυμα, με αναλογία 0,25 mL/L, και τα ψάρια τοποθετούνταν στο δοχείο αναισθητοποίησης ανά ομάδες των 10 ατόμων. Παρέμεναν έως ότου εκδηλωθούν ορατά σημάδια καταστολής (χαμηλή κινητικότητα, απώλεια ισορροπίας), που υποδήλωναν την επιτυχή τους αναισθητοποίηση.

Κατά τη μέτρηση, κάθε ψάρι τοποθετούνταν πρώτα σε απορροφητικό χαρτί για την απομάκρυνση των σταγονιδίων νερού, ακολούθως ζυγιζόταν σε πλαστικό τριβλίο (Εικ.8α) και στη συνέχεια μετρούνταν το μήκος του στο ιχθυόμετρο (Εικ.8β).

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, τα ψάρια μεταφέρονταν σε δοχείο ανάνηψης με υπερκορεσμένο σε οξυγόνο νερό, όπου παρέμεναν για περίπου 15 λεπτά μέχρι την πλήρη ανάκτηση της κινητικότητάς τους. Κατόπιν, επέστρεφαν στις δεξαμενές εκτροφής. Η όλη διαδικασία διεξαγόταν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταχύτητα και προσοχή, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το στρες στους ιχθύες. Η επόμενη σίτιση πραγματοποιούνταν λίγες ώρες μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων.



Εικόνα 8. (α) Μέτρηση μήκους ιχθύων κυπρίνου και (β) μέτρηση βάρους ιχθύων κυπρίνου που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη την πειραματική διαδικασία (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

2.8. Μετρήσεις μορφομετρικών χαρακτηριστικών μαρουλιού

Οι μετρήσεις των μαρουλιών ξεκίνησαν την ημέρα μηδέν και πραγματοποιούνταν ανά 10 ημέρες καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Κατά τις μετρήσεις καταγράφονταν ο αριθμός των βλαστών, το ύψος του φυτού, ο αριθμός των

φύλλων, το αρχικό νωπό βάρος, καθώς και ο αριθμός των ξερών ή νεκρωμένων βλαστών.

Το ύψος των φυτών μετριοτάνα με χάρακα, ο οποίος τοποθετούνταν στη βάση του βλαστού, στο υπέργειο τμήμα του φυτού. Για τον προσδιορισμό της παραγόμενης βιομάζας, το υπέργειο μέρος κάθε φυτού διαχωριζόταν από τις ρίζες και ξηραίνονταν σε φούρνο στους 70°C για χρονική διάρκεια 48 h.

Μετά την ξήρανση, το ξηρό βάρος καθοριζόταν με χρήση ζυγού ακριβείας τύπου AND HR-200-HR. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την ακριβή εκτίμηση της συσσωρευμένης φυτικής μάζας και παρείχε κρίσιμα δεδομένα για την αξιολόγηση της ανάπτυξης των φυτών, σε συνάρτηση με τις διαφορετικές συνθήκες διατροφής των ιχθύων στο σύστημα.

2.9. Μετρήσεις αβιοτικών παραγόντων

Σύμφωνα με το πειραματικό πρωτόκολλο, πραγματοποιούνταν εβδομαδιαίες μετρήσεις των βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού, οι οποίες περιλάμβαναν την ολική αμμωνία (TAN), τα νιτρώδη (NO_2^-), τα νιτρικά (NO_3^-) και τα φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}).

Η δειγματοληψία γινόταν τις πρωινές ώρες, πριν από τη χορήγηση τροφής, ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές από υπολείμματα τροφής ή πρόσφατες μεταβολικές απεκκρίσεις. Τα δείγματα συλλέγονταν από τρία προκαθορισμένα σημεία σε κάθε πειραματικό κύκλωμα:

- Από το σημείο εισόδου του νερού στις υδροπονικές δεξαμενές καλλιέργειας των μαρουλιών
- Από τον σωλήνα εξόδου του νερού από τις υδροπονικές δεξαμενές
- Από το σημείο εισόδου του νερού στο φίλτρο, δηλαδή την απορροή από τις δεξαμενές εκτροφής των ιχθύων

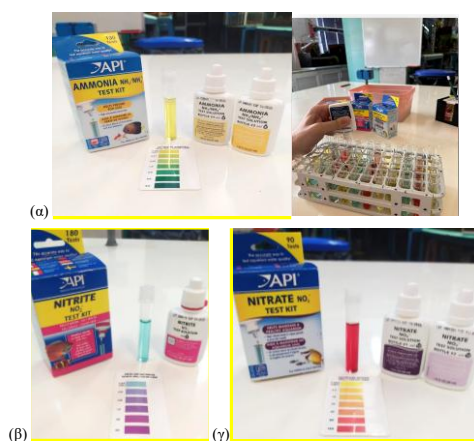
Από κάθε σημείο λαμβάνονταν δείγμα 5 mL νερού, το οποίο τοποθετούνταν σε υάλινα φιαλίδια ίδιας χωρητικότητας. Για την αντιστάθμιση της ημερήσιας εξάτμισης του νερού, γινόταν καθημερινή συμπλήρωση με καθαρό νερό. Παράλληλα, σε εβδομαδιαία βάση πραγματοποιούνταν καταγραφή της θερμοκρασίας και του pH τόσο στις δεξαμενές εκτροφής των ιχθύων όσο και στις δεξαμενές καλλιέργειας των φυτών. Οι μετρήσεις αυτές γίνονταν με τη χρήση φορητού πολύμετρου τύπου HACH HQ 40 D.

2.9.1. Προσδιορισμός ολικής αμμωνίας TAN

Η παρακολούθηση των επιπέδων ολικής αμμωνίας (TAN) στα ενυδρείοπονικά συστήματα (Εικ. 9α) πραγματοποιήθηκε μέσω συλλογής δειγμάτων νερού 5 mL από τα σημεία δειγματοληψίας που περιγράφηκαν προηγουμένως. Η διαδικασία ακολούθησε τη μέθοδο των Liddicoat et al. (1975), η οποία βασίζεται στη χρήση φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και την προσθήκη σιδηρούχου καταλύτη.

Η διαδικασία περιλάμβανε τα εξής στάδια:

- Προσθήκη του δείγματος νερού σε υάλινη κυψελίδα χωρητικότητας 5 mL
- Προσθήκη 8 σταγόνων από το αντιδραστήριο Ammonia #1
- Ανάδευση του δείγματος για περίπου 5 sec
- Προσθήκη 8 σταγόνων από το αντιδραστήριο Ammonia #2
- Νέα ανάδευση για 5 sec
- Αναμονή 5 min για την ανάπτυξη του χρώματος στο διάλυμα
- Σύγκριση της απόχρωσης του δείγματος με την κλίμακα αναφοράς για την εκτίμηση της συγκέντρωσης TAN



Εικόνα 9. Μετρήσεις αζωτούχων παραγώγων (α) μετρήσεις ολικής αμμωνίας, (β)μετρήσεις νιτρωδών ιόντων και (γ) μετρήσεις νιτρικών ιόντων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

2.9.2. Προσδιορισμός νιτρωδών ιόντων (NO_2^-)

Η παρακολούθηση των επιπέδων νιτρωδών ιόντων στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Εικ. 9β) πραγματοποιήθηκε μέσω συλλογής δειγμάτων νερού όγκου 5 mL από τα προκαθορισμένα σημεία του συστήματος. Η ανάλυση βασίστηκε στη μέθοδο των Liddicoat et al., (1975), η οποία χρησιμοποιεί ως χημικό υπόβαθρο την αντίδραση φαινόλης αλκοόλης σε συνδυασμό με οξειδωτικό διάλυμα και την παρουσία σιδηρούχου καταλύτη. Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω:

- Προσθήκη δείγματος νερού σε γυάλινο δοχείο των 5mL από το σύστημα
- Προσθήκη 5 σταγόνων από το αντιδραστήριο Nitrite
- Ανάδευση για 5sec ώστε να ομογενοποιηθεί το δείγμα
- Αναμονή 5min μέχρι το δείγμα να χρωματιστεί
- Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με την κλίμακα των νιτρωδών

2.9.3. Προσδιορισμός νιτρικών ιόντων (NO_3^-)

Η παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Εικ. 9γ) πραγματοποιήθηκε με συλλογή δειγμάτων νερού όγκου 5 mL από τα προκαθορισμένα σημεία του κυκλώματος, όπως περιγράφονται στο πειραματικό πρωτόκολλο. Η μεθοδολογία βασίστηκε στην προσέγγιση των Liddicoat et al. (1975) και στηρίζεται στη χρήση φαινόλης σε αλκοολικό περιβάλλον, σε συνδυασμό με οξειδωτικό διάλυμα και καταλύτη σιδήρου.

Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω:

- Προσθήκη δείγματος νερού σε γυάλινο δοχείο των 5mL από το σύστημα
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο Nitrate#1
- Καλή ανάδευση για 5sec
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο Nitrate#2
- Καλή ανάδευση για 5sec
- Αναμονή για 5min μέχρι το δείγμα να χρωματιστεί
- Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με την κλίμακα των Νιτρικών ιόντων

2.9.4. Προσδιορισμός φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-})

Η παρακολούθηση των φωσφορικών ιόντων στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Εικ. 9δ) πραγματοποιήθηκε με συλλογή δειγμάτων νερού όγκου 5 mL από τα ήδη προκαθορισμένα σημεία δειγματοληψίας του συστήματος. Η μέθοδος ανάλυσης βασίστηκε στην προσέγγιση που περιγράφηκε από τους Liddicoat et al., (1975), η οποία περιλαμβάνει τη χρήση φαινόλης σε αλκοολικό διάλυμα, σε συνδυασμό με οξειδωτικό παράγοντα και σιδηρούχο καταλύτη. Η εφαρμογή της μεθόδου επιτρέπει τον χρωματισμό του δείγματος, το οποίο συγκρίνεται με πρότυπη χρωματική κλίμακα, ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η συγκέντρωση των φωσφορικών ιόντων στο νερό.

Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω:

- Προσθήκη δείγματος νερού σε γυάλινο δοχείο του 1mL
- Προσθήκη 6 σταγόνων από το αντιδραστήριο Phosphate#1
- Ανάδευση για 5sec έως ότου το δείγμα ομογενοποιηθεί
- Προσθήκη 6 σταγόνων από το αντιδραστήριο Phosphate #2
- Ανάδευση για 5sec
- Αναμονή για 3min μέχρι το δείγμα να χρωματιστεί
- Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με την κλίμακα των φωσφορικών

2.9.5. Μετρήσεις pH

Το pH μετρούνταν με test kit σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

- Προσθήκη 5mL από το δείγμα
- Προσθήκη 3 σταγόνες από το αντιδραστήριο pH Test Solution
- Ανάδευση του δείγματος για 10 sec
- Αναμονή για 5 min
- Έλεγχος και σύγκριση του χρώματος με την κλίμακα μέτρησης pH.

2.10. Δείκτες ανάπτυξης κυπρίνου και μαρουλιού

Η ανάπτυξη του κυπρίνου και του μαρουλιού υπολογίστηκαν με βάση τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις (Vlahos et al., 2023, Φιλίντα, 2024):

Επιβίωση (%):

$$S (\%) = (\text{Τελικός αριθμός ψαριών} / \text{αρχικός αριθμός ψαριών}) * 100$$

Ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (SGR):

$$\text{SGR } (\%/ \text{ημέρα}) = [(\text{Ln } (W_t) - \text{Ln } (W_a)) * 100] / \text{ημέρες σίτισης}$$

όπου: W_t = Τελικό βάρος (gr) και W_a = Αρχικό βάρος (gr)

$$\text{Αύξηση Βάρους (WG, g/fish)} = \text{FBW} - \text{IBW}$$

Συντελεστής Μετατρεψιμότητας της Τροφής (FCR)= Κατανάλωση τροφής (g)/αύξηση βάρους (g)

Ημερήσια πρόσληψη τροφής (DFI, %/d):

$$\text{DFI (daily food intake)} = 100 * [(\text{Κατανάλωση τροφής} / \text{αύξηση βάρους}) / \text{ημέρες σίτισης}]$$

Συντελεστής εθελούσιας τροφοληψίας (VFI %/ημέρα) =

$$= \frac{\text{Συνολική ποσότητα καταναλωθείσας τροφής (g)} * 100}{[(\text{Αρχικό} + \text{Τελικό βάρος ιχθύος}) * 0,5] * \text{ημέρες πειράματος αύξησης}}$$

Αποδοτικότητα Πρωτεΐνης (PER) = Αύξηση βάρους (g)/πρόσληψη πρωτεΐνης (g)

Συντελεστής ευρωστίας (Fulton) : K (g/cm³) = $100 \times \text{FBW (g)} / \text{FBL}^3 \text{ (cm)}$

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τον υπολογισμό της αύξησης των φυτών είναι:

Αύξηση ύψους Φυτού (LG), cm = FH – IH

Αύξηση Βιομάζας (BG), g = FB – IB

Αύξηση κλάδων (BrG) = FBr – IBr

Παραγωγικότητα kg/m² = FW/ επιφάνεια Grow bed

Όπου: IH και FH είναι τα αρχικό και τελικό ύψος του μαρουλιού,

IB και FB το αρχικό και τελικό βάρος του μαρουλιού,

IBr και FBr είναι ο αρχικός και τελικός αριθμός των κλάδων του μαρουλιού.

2.11. Δείκτες απόδοσης φίλτρου ενυδρειοπονικών συστημάτων

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας καθώς και ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της TAN στο φίλτρο υπολογίζονται από τους παρακάτω μαθηματικούς τύπους:

$$\text{Ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (PTAN)} = PC * F * 0.102/t$$

όπου:

PC: είναι η συγκέντρωση της πρωτεΐνης στην τροφή

F: ποσότητα τροφής που χορηγείται σε ημερήσια βάση

t: χρόνος μεταξύ γευμάτων (από το πρώτο στο δεύτερο γεύμα κλπ)

Ο ρυθμός απορρόφησης Θρεπτικών

$$\text{NRE (\%)} = (Ci - Ce) * 100 / Ci \quad (\text{TAN, PO}_4^-, \text{NO}_3^-)$$

Όπου, Ci και Ce: συγκέντρωση θρεπτικού στην είσοδο και έξοδο της υδροπονικής δεξαμενής ή του φίλτρου όταν πρόκειται για την αμμωνία.

Ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της TAN στο φίλτρο (VTR biobiofilter) (gTAN/m³/d) υπολογίστηκε από την παρακάτω μαθηματική σχέση (Kamstra et al., 1998)

$$\text{VTR}_{\text{φίλτρου}} = (\text{TAN}_{\text{in}} - \text{TAN}_{\text{out}}) * K_c * Q/V$$

Όπου:

TAN_{in} = Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m³)

TAN_{out} = Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m³)

K_c = Σταθερός αριθμός

Q = Παροχή νερού (m³/day)

V = Όγκος φίλτρου (m³)

Ο ρυθμός μεταβολής των νιτρικών ιόντων από τα φυτά στο υδροπονικά υποσυστήματα με τη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας (TAN retained (kg/m²/d)) υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\text{NO}_3^- \text{ retained} = Q * (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) / V - d * \text{βάθος φίλτρου (m)}$$

Όπου:

Q = Παροχή νερού (m³/day)

C_{in} = Νιτρικά στο σημείο εισόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή
 C_{out} = Νιτρικά στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή
 V = Όγκος φίλτρου (m^3)
 d = Μεταβολή (C_{out}/dt)

2.12. Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάλυσης διακύμανσης μονής κατεύθυνσης (one-way ANOVA), με το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας το 5% ($p < 0.05$). Η κανονικότητα των δεδομένων ελέγχθηκε με το Kolmogorov-Smirnov test, ενώ ο έλεγχος της ομοιογένειας των διακυμάνσεων πραγματοποιήθηκε με το Levene test. Η σύγκριση των μέσων όρων μεταξύ των διαφορετικών πειραματικών μεταχειρίσεων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πολλαπλών συγκρίσεων Tukey και Tukey-b (Zar, 1999). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως $MO \pm SEM$. Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων διενεργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SPSS 27.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αβιοτικοί παράγοντες

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το παρών πείραμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, ο οποίος περιγράφει τις μέσες συγκεντρώσεις των ανόργανων θρεπτικών συστατικών και κυρίως της ολικής αμμωνίας (TAN, mg/L), των νιτρικών ιόντων (NO_3^- mg/L), των φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-} mg/L) για όλες της ημέρες που διήρκεσε η πειραματική διαδικασία (45 ημέρες). Η χορήγηση διαφορετικών ποσοτήτων τροφής στους κυπρίνους (2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα) επηρέασε τις συγκεντρώσεις των αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων στα συστήματα ενυδρείοπονίας, καθώς και την απορρόφησή τους, από τα μαρούλια. Οι συγκεντρώσεις της TAN in δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p>0.05$ Πιν.2).

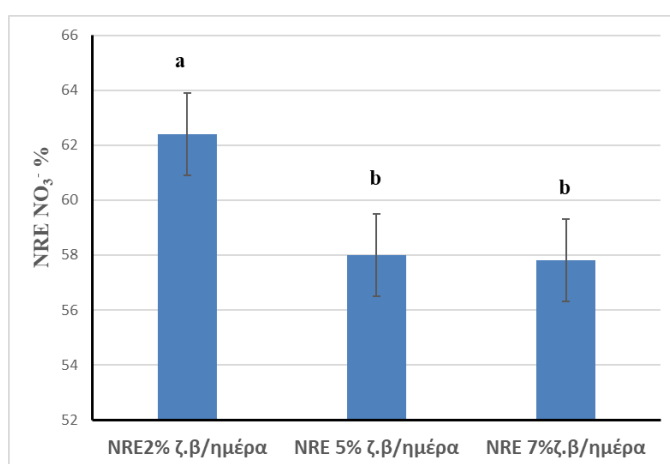
Πίνακας 2 Ποιότητα του νερού στο σύστημα ενυδρείοπονίας όταν συγκαλλιεργήθηκε με τον κυπρίνο με διαφορετικά επίπεδα διατροφής 2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα.

	2% ζ.β ιχθύος/ημέρα	5% ζ.β ιχθύος/ημέρα	7% ζ.β ιχθύος/ημέρα
TAN in (mg/L)	0.87± 0,01 ^a	0,88±0,05 ^a	0,91± 0.01 ^a
NO_3^- in (mg/L)	60.00±3.54 ^a	72.50±7.50 ^b	73.75±6,25 ^b
NO_3^- out (mg/L)	20.83±5.23 ^a	22.50±7.83 ^a	48.33±1.46 ^c
PO_4^{3-} in (mg/L)	2.58±0.37 ^a	4.00± 0.93 ^b	3.00±0.68 ^a
PO_4^{3-} out (mg/L)	1.50±0.22 ^a	2,25±0.60 ^b	1,83±0.16 ^b
NRE NO_3^- (mg/L)	63.13±5.22 ^a	56.67±6.66 ^b	59.27±9.26 ^b
NRE PO_4^{3-} (mg/L)	45,0±3,16 ^a	45,5±2,78 ^a	57,92±3,56 ^b
pH	7,74±0,19 ^a	7,86±0,16 ^a	7,74±0,11 ^a

Τα δεδομένα εκφράζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα ($\text{MO} \pm \text{SEM}$). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά (ANOVA, $p>0.05$) ($n=20$).

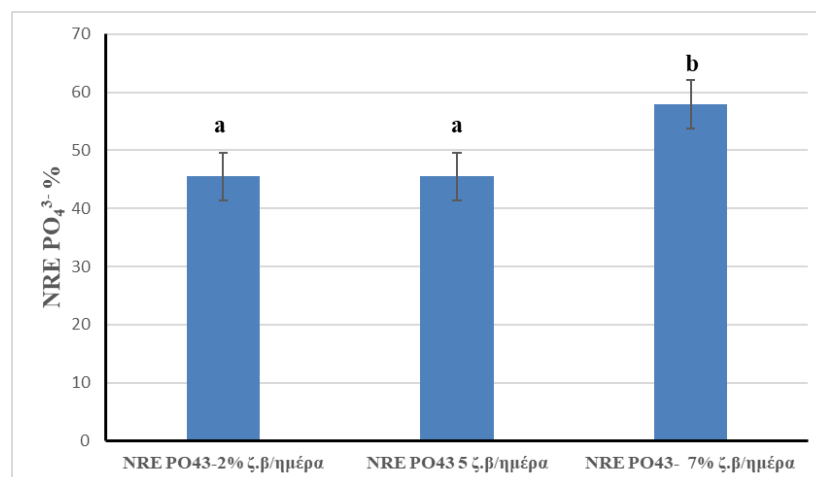
Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών (NO_3^-) στο σημείο εισόδου του νερού στις υδροπονικές δεξαμενές παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p < 0.05$). Ωστόσο, η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων παρουσίασε σημαντική στατιστική διαφορά, μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p < 0.05$, Πιν.2), φανερώνοντας μειωμένη απορρόφηση όταν οι κυπρίνοι σιτίζονται με το υψηλότερο επίπεδο σίτισης. Οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-}) στο σημείο εισόδου του νερού στο υδροπονικό υποσύστημα παρουσίασαν στατιστικά μεγαλύτερη τιμή απορρόφησης στη μεταχείριση 5% του ζ.β/ημέρα συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις 7% του ζ.β/ημέρα και 2% του ζ.β/ημέρα. Η συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων στο σημείο εξόδου του νερού από το υδροπονικό υποσύστημα παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες τιμές στις μεταχειρίσεις του κυπρίνου που σιτίστηκαν με 5% και 7% του ζ.β/ημέρα, αντίστοιχα γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη είσοδο φωσφόρου στα συστήματα.

Υπολογίστηκε επίσης η ποσοστιαία απορρόφηση (NRE, %) των νιτρικών ιόντων NO_3^- και των φωσφορικών ιόντων στα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας του μαρουλιού. Όσον αφορά την ποσοστιαία απομάκρυνση των νιτρικών ιόντων (NRE NO_3^-), η στατιστικά υψηλότερη τιμή καταγράφηκε στη μεταχείριση του 2% του ζ.β/ημέρα ($63,13 \pm 5,22\%$), ενώ στα 5% και 7% του ζ.β/ημέρα η αποδοτικότητα μειώθηκε σημαντικά ($56,67 \pm 6,66\%$ και $59,27 \pm 9,26\%$), γεγονός που υποδηλώνει κορεσμό ή περιορισμό στην ικανότητα του μαρουλιού να απορροφά νιτρικά ιόντα σε υψηλότερες φορτίσεις (Πιν.2, Σχ.1).



Σχήμα 1. Απορρόφηση νιτρικών ιόντων (NRE) του μαρουλιού για διάστημα 45 ημερών. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$). Οι μέσοι όροι εκφράζονται ως $\text{MO} \pm \text{SEM}$.

Αντίθετα, η ποσοστιαία απορρόφηση των φωσφορικών ιόντων (NRE PO_4^{3-}) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μεταχειρίσεις 2% του ζ.β/ημέρα και 5% του ζ.β/ημέρα ($45,0 \pm 3,16\%$ και $45,5 \pm 2,78\%$ αντίστοιχα), αλλά αυξήθηκε σημαντικά στη διατροφική μεταχείριση των κυπρίνων που σιτίστηκαν με 7% του ζ.β/ημέρα ($57,92 \pm 3,56\%$), υποδεικνύοντας πιθανή αύξηση της απορροφητικής ικανότητας των φυτών σε υψηλότερη διαθεσιμότητα φωσφόρου (Πιν.2, Σχ.2).



Σχήμα 2. Απορρόφηση φωσφορικών ιόντων (NRE) του μαρουλιού για διάστημα 45 ημερών. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$). Οι μέσοι όροι εκφράζονται ως $\text{MO} \pm \text{SEM}$.

3.2. Βιοτικοί Παράγοντες

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις μέσες συγκεντρώσεις της ανάπτυξης του κοινού κυπρίνου για διάρκεια 45 ημέρες όταν εκτρέφεται σε κλειστό σύστημα ενυδρείοπονίας με ανακύκλωση νερού. Κατά την πειραματική διάρκεια, παρατηρήθηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων σίτισης ως προς την ανάπτυξη του κυπρίνου. Το μέσο αρχικό βάρος σώματος (IBW) και μέσο αρχικό μήκος (IBL) κατά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p > 0.05$, Πιν.3), γεγονός που επιβεβαιώνει την ομοιομορφία των βαρών και μηκών των ψαριών στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας.

Στο τέλος του πειράματος (D45), το τελικό βάρος (FBW) του κυπρίνου αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση της προσφερόμενης τροφής (ANOVA, $p < 0.05$). Συγκεκριμένα, οι ιχθύες που σιτίστηκαν με 2% του ζ.β ιχθύος παρουσίασαν μέσο FBW

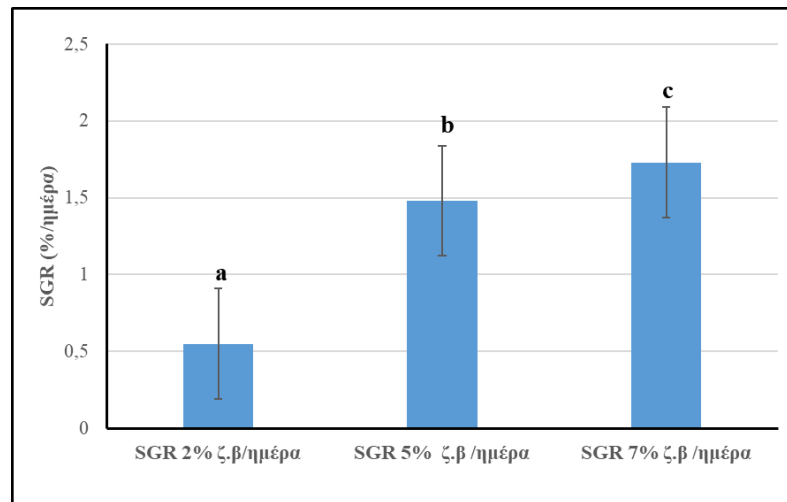
4.76±0.20 g, ενώ οι κυπρίνοι που σιτίστηκαν με το 5% του ζ.β./ημέρα και το 7% του ζ.β./ημέρα παρουσίασαν υψηλότερες τιμές 6.73±0.46 g και 8.47±0.90 g αντίστοιχα (FBW: 2% < 5% < 7%), παρουσιάζοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των πειραματικών μεταχειρίσεων (ANOVA, p<0.05).

Αντίστοιχα, η μέση ημερήσια αύξηση βάρους (WG) παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, p<0.05) με την αυξανόμενη πρόσληψη της τροφής: 1.11±0.20 g (2%), 3.08±0.46 g (5%) και 4.88±0.91 g (7%) (Πιν.3). Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (SGR) ακολούθησε παρόμοιο μοτίβο, με σημαντική βελτίωση από 0.55±0.13 %/ημέρα στη μεταχείριση που σιτίστηκε με 2% του ζ.β./ημέρα σε 1.48±1.09 %/ημέρα για τους κυπρίνους που σιτίστηκαν με 5% του ζ.β./ημέρα και 1.73±0.30 %/ημέρα για τους κυπρίνους που σιτίστηκαν με 7% του ζ.β./ημέρα (ANOVA, p<0.05) (Πιν.3).

Πίνακας 3 Δείκτες ανάπτυξης του κυπρίνου στο ενυδρειοπονικό σύστημα όταν συγκαλλιεργήθηκε με μαρούλι για 45 ημέρες

	2% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	5% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	7% του ζ.β ιχθύος/ημέρα
IBW (gr)	3.65±0.11 ^a	3.65± 0.17 ^a	3.59±0.23 ^a
FBW (gr)	4.76± 0.20 ^a	6.73±0.46 ^b	8.47± 0.9 ^c
IBL(cm)	6.25±0.09 ^a	6.29± 0.1 ^a	6.05±0.21 ^a
FBL (cm)	6.91± 0.10 ^a	7.14± 0.30 ^b	7.49±0.40 ^b
ABW (gr)	4.21± 0.09 ^a	5.19± 0.23 ^b	6.03±0.47 ^c
WG (gr)	1,11± 0,20 ^a	3,08±0,46 ^b	4,88± 0,91 ^c
SGR (%/d)	0.55± 0.13 ^a	1.48± 1.09 ^b	1.73±0.30 ^c
K _{IN} (Fulton gr/cm ³)	1.54±0.10 ^a	1.44± 0.34 ^a	1.74± 0.13 ^a
K _{FIN} (Fulton, gr/cm ³)	1.42± 0.02 ^a	1.60±0.02 ^b	1.61± 0.03 ^b

Τα δεδομένα εκφράζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα (MO ± SEM). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά (ANOVA, p>0.05) (n=117).



Σχήμα 3. SGR κυπρίνου (*C. carpio*) που συγκαλλιεργήθηκε με μαρούλι (*L. sativa*) σε σύστημα ενυδρείοπονίας για διάστημα 45 ημερών. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$). Οι μέσοι όροι εκφράζονται ως $MO \pm SEM$.

Το τελικό μήκος σώματος (FBL) παρουσίασε αυξητική τάση με την αυξανόμενη ποσότητα τροφής (6.91 cm → 7.14 cm → 7.49 cm), χωρίς να παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p > 0.05$, Πιν3, Σχ.3).

Ο αρχικός συντελεστής ευρωστίας (Fulton) (K_{in}) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p > 0.05$), σε σχέση με το K_{fin} ο οποίος παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μεταχειρίσεις που διατράφηκαν με 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα σε αντίθεση με τη μεταχείριση που σιτίστηκαν με 2% του ζ.β./ημέρα (1.60 και 1.61 έναντι 1.42, ANOVA, $p < 0.05$), υποδηλώνοντας αύξηση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των ψαριών με την αύξηση της ποσότητας τροφής (Πιν.3, Σχ.3).

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως η αύξηση του ποσοστού διατροφής οδηγεί σε σημαντικά καλύτερες επιδόσεις στους δείκτες ανάπτυξης και αύξησης του βάρους. Η ομάδα 7% του ζ.β./ημέρα παρουσίασε τη μέγιστη απόδοση, τόσο σε απόλυτο βάρος όσο και στο ρυθμό ανάπτυξης. Ωστόσο, η μεταχείριση 5% του ζ.β./ημέρα συνιστά μια μέση λύση η οποία οδηγεί σε εξοικονόμηση της τροφής και έλεγχο του φορτίου επιβάρυνσης του συστήματος.

3.3. Δείκτες αξιολόγησης και εκμετάλλευσης της τροφής

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τους δείκτες αξιολόγησης και εκμετάλλευσης της τροφής τον FCR, την εθελούσια και ημερήσια πρόσληψη της τροφής από τους κυπρίνους, καθώς και την αποδοτικότητα των πρωτεϊνών.

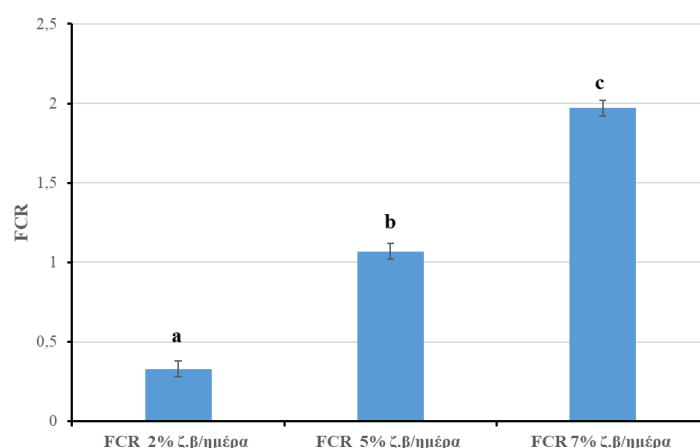
Πίνακας 4. Δείκτες αξιοποίησης και εκμετάλλευσης της τροφής του κυπρίνου όταν διατράφηκε με διαφορετικά επίπεδα διατροφής 2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα.

	2% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	5% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	7% του ζ.β ιχθύος/ημέρα
FCR	0.33± 0,01 ^a	1.07±0,05 ^b	1.97± 0.22 ^c
VFI (%/ημέρα)	1.04±0.02 ^a	3.63±0.10 ^b	6.12±0.26 ^c
DFI (gr/ημέρα)	1.35±0.01 ^a	1,89±0.08 ^b	1,87±0,11 ^b
PER	1.46± 0.27 ^b	1.11± 0.16 ^a	1.02±0.19 ^a

Τα δεδομένα εκφράζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα (MO ± SEM). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά (ANOVA, $p>0.05$) (n=20).

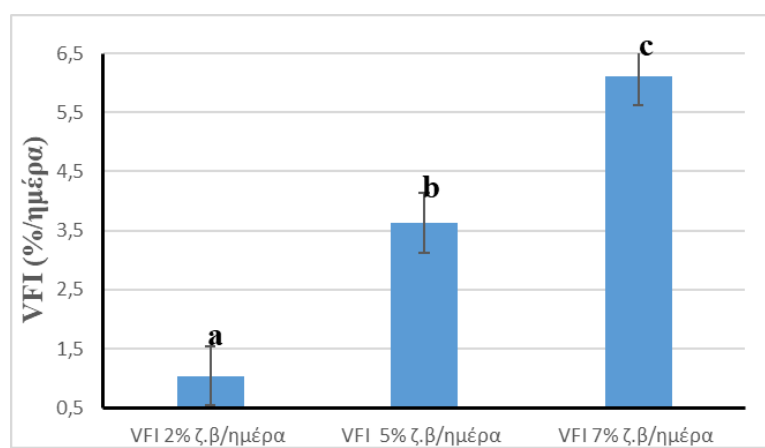
Η παροχή των διαφορετικών ποσοστών διατροφής (2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα) επηρέασε σημαντικά τόσο την κατανάλωση όσο και την εκμετάλλευση της τροφής από τον κυπρίνο.

Ο συντελεστής FCR αυξήθηκε στατιστικά σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού σίτισης, από 0.33 ± 0.01 για τη μεταχείριση που σιτίζονταν με 2% του ζ.β. ιχθύος/ημέρα σε 1.07 ± 0.05 και 1.97 ± 0.22 , αντίστοιχα στις μεταχειρίσεις με επίπεδο σίτισης 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα αντίστοιχα (ANOVA, $p<0.05$, Σχ.3).



Σχήμα 3. FCR κυπρίνου (*C. carpio*) που συγκαλλιεργήθηκε με μαρούλι (*L. sativa*) σε σύστημα ενυδρείοπονίας για διάστημα 45 ημερών. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p<0.05$). Οι μέσοι όροι εκφράζονται ως MO±SEM.

Ο συντελεστής εθελούσιας τροφοληψίας (VFI %/ημέρα) των κυπρίνων ακολούθησε επίσης αναμενόμενη ανοδική πορεία παρουσιάζοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p<0.05$). Ο συντελεστής VFI διακυμάνθηκε από 6.12 ± 0.26 %/ημέρα για τους κυπρίνους που διατρέφονταν με το υψηλότερο επίπεδο σίτισης (7% του ζ.β./ημέρα), συγκριτικά με τους κυπρίνους που σιτίστηκαν με το χαμηλότερο ποσοστό σίτισης (2% του ζ.β./ημέρα) που ήταν 1.35 ± 0.01 %/ημέρα και το μεσαίο ποσοστό σίτισης (5% του ζ.β./ημέρα) που ήταν 3.63 ± 0.10 %/ημέρα (Σχ.4).



Σχήμα 4. VFI κυπρίνου (*C.carpio*) που συγκαλλιεργήθηκε με μαρούλι (*L sativa*) σε σύστημα ενυδρείοπονίας για διάστημα 45 ημερών. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p<0.05$). Οι μέσοι όροι εκφράζονται ως $MO \pm SEM$.

Η ημερήσια πρόσληψη τροφής (DFI gr/ ημέρα) παρουσίασε μικρή διακύμανση, με την υψηλότερη τιμή (1.89 ± 0.08 g/ημέρα) να παρουσιάζεται στη μεταχείριση όπου χορηγήθηκε τροφή 5% του ζ.β./ημέρα, συγκριτικά με τη μεταχείριση όπου σιτίστηκε με το μικρότερο επίπεδο διατροφής (2% του ζ.β./ημέρα), και ήταν στατιστικά μικρότερη (1.35 ± 0.01 gr/ημέρα) (ANOVA, $p<0.05$). Όσον αφορά τον δείκτη απόδοσης της πρωτεΐνης (PER), η στατιστικά μεγαλύτερη τιμή (ANOVA, $p<0.05$) παρατηρήθηκε στην μεταχείριση με το χαμηλότερο ποσοστό σίτισης (2% του ζ.β./ημέρα) και ήταν 1.46 ± 0.27 , ενώ στις μεταχειρίσεις 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα παρατηρήθηκε σημαντικά χαμηλότερη αποδοτικότητα της πρωτεΐνης (1.11 ± 0.16 και 1.02 ± 0.19 , αντίστοιχα).

3.4. Δείκτες ανάπτυξης του μαρουλιού

Η χορήγηση των διαφορετικών ποσοστών σίτισης (2% του ζ.β/ημέρα, 5% ζ.β/ημέρα και 7% ζ.β/ημέρα) στους ιχθύες επέδρασε σημαντικά την ανάπτυξη του μαρουλιού. Το αρχικό ύψος των φυτών (Hin) με την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p>0.05$, Πιν.5) μεταξύ των μεταχειρίσεων ($8,35\pm0,32\text{cm}$, $8,40\pm0,11\text{cm}$ και $8,05\pm0,10\text{cm}$ για τις μεταχειρίσεις 2% ζ.β/ημέρα, 5% ζ.β/ημέρα και 7% ζ.β/ημέρα, αντίστοιχα).

Πίνακας 5. Δείκτες ανάπτυξης φυτών μαρουλιού στο σύστημα ενυδρείοπονίας όταν συγκαλλιεργήθηκε με τον κυπρίνο με διαφορετικά επίπεδα διατροφής 2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα.

	2% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	5% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	7% του ζ.β ιχθύος/ημέρα
Win (gr)	$0.87\pm 0,01^a$	$0,88\pm0,05^a$	$0,91\pm 0.01^a$
H in (cm)	8.35 ± 0.32^a	8.40 ± 0.11^a	8.05 ± 0.10^a
Hfin (cm)	12.41 ± 1.34^a	13.00 ± 0.99^b	14.63 ± 1.46^c
LH (cm)	3.92 ± 1.29^a	4.82 ± 0.95^b	5.7 ± 1.41^c
Productivity (gr/m^2)	9.74 ± 1.21^a	$18,94\pm3.15^b$	$17,01\pm1.65^b$

Τα δεδομένα εκφράζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα ($\text{MO} \pm \text{SEM}$). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά (ANOVA, $p>0.05$) ($n=20$).

Ωστόσο, το τελικό ύψος (Hfin) αυξήθηκε στατιστικά σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού της τροφής ($12,41\pm1,34\text{cm}$, $13,00\pm0,99\text{cm}$ και $14,63\pm1,46\text{cm}$), όπως και η συνολική ανάπτυξη των φυτών η οποία παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p<0.05$), (LH: $3,92\pm1,29\text{cm}$, $4,82\pm0,95\text{cm}$ και $5,70\pm1,41\text{cm}$).

Όσον αφορά την παραγωγικότητα του μαρουλιού (gr/m^2), η υψηλότερη στατιστικά τιμή (ANOVA, $p<0.05$) παρατηρήθηκε στην διατροφική ομάδα 5% του ζ.β/ημέρα ($18,94\pm3,15 \text{ gr/m}^2$), ενώ η μεταχείριση 7% του ζ.β/ημέρα παρουσίασε ελαφρώς χαμηλότερη παραγωγικότητα ($17,01\pm1,65 \text{ gr/m}^2$), γεγονός που υποδηλώνει πιθανό κορεσμό του συστήματος ή μείωση της αποδοτικότητας λόγω αυξημένου

φορτίου στο σύστημα. Η χαμηλότερη στατιστικά παραγωγικότητα καταγράφηκε στη διατροφική ομάδα 2% του ζ.β./ημέρα (ANOVA, $p < 0.05$), ($9,74 \pm 1,21$ gr/m²). Συνολικά, η χορήγηση της τροφής στο επίπεδο του 5% του ζ.β./ημέρα φαίνεται να αποτελεί το βέλτιστο σημείο για την υποστήριξη της φυτικής παραγωγής στο σύστημα, ισορροπώντας την παροχή θρεπτικών με την αποδοτικότητα της καλλιέργειας.

3.5. Παράμετροι απόδοσης του φίλτρου

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τους παραμέτρους απόδοσης του φίλτρου των πειραματικών μεταχειρίσεων οι οποίοι εκφράζονται μέσω του ρυθμού παραγωγής της αμμωνίας (P_{TAN}) και το ρυθμό μεταβολής των νιτρικών ιόντων ($VTR\ NO_3^-$) από τα φυτά στα υδροπονικά υποσυστήματα καλλιέργειας για 45 ημέρες.

Οι παράμετροι του φίλτρου παρουσίασαν στατιστικές διαφορές σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις με τη μικρότερη τιμή P_{TAN} να παρουσιάζεται στη μεταχείριση όπου οι κυπρίνοι διατράφηκαν με το μικρότερο επίπεδο διατροφής (2 του ζ.β./ημέρα) σε σύγκριση με το 5% του ζ.β./ημέρα και το 7% του ζ.β./ημέρα (ANOVA, $p < 0.05$, Πιν 6). Ο ογκομετρικός ρυθμός μεταβολής των νιτρικών ιόντων στο φίλτρο ήταν στατιστικά μεγαλύτερος στη μεταχείριση όπου οι κυπρίνοι σιτίστηκαν με 7% του ζ.β./ημέρα (ANOVA, $p < 0.05$, Πιν.6).

Ο ρυθμός μεταβολής των νιτρικών ιόντων από τα μαρούλια στο ενυδρειοπονικά συστήματα παρουσιάστηκε να είναι σημαντικά καλύτερος στις μεταχειρίσεις όπου οι κυπρίνοι σιτίστηκαν με ποσοστά 2% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα συγκριτικά με τη μεταχείριση 5% του ζ.β./ημέρα (ANOVA, $p < 0.05$. Πιν.6).

Πίνακας 6. Παράμετροι απόδοσης του φίλτρου των ενυδρειοπονικών συστημάτων καλλιέργειας μαρουλιού όταν συγκαλλιεργήθηκε με τον κοινό κυπρίνο με διαφορετικά επίπεδα διατροφής 2% του ζ.β./ημέρα, 5% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα.

	2% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	5% του ζ.β ιχθύος/ημέρα	7% του ζ.β ιχθύος/ημέρα
P_{TAN} (mg/L)	$0.15 \pm 0,01^a$	$1.56 \pm 0,07^b$	3.41 ± 0.22^c
VTR (gr NO_3^- /m ³)	10.69 ± 3.66^a	6.68 ± 1.76^b	13.02 ± 5.42^c
NO_3^- retained (Kg/m ² /day)	7.02 ± 2.58^a	4.63 ± 1.22^b	9.0 ± 3.76^b

Τα δεδομένα εκφράζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα ($MO \pm SEM$). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά (ANOVA, $p > 0.05$) ($n=18$, $nPTAN=9$).

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Αβιοτικοί παράγοντες

Στο παρόν πείραμα, οι τιμές του pH παρουσίασαν μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων, παραμένοντας σε αλκαλικό εύρος. Πιο συγκεκριμένα, η μεταχείριση με 2% του ζ.β./ημέρα εμφάνισε μέση τιμή pH 7,74, η μεταχείριση 5% του ζ.β./ημέρα παρουσίασε ελαφρώς υψηλότερη τιμή (7,86), ενώ στο υψηλότερο επίπεδο τιμή σίτισης (7% ζ.β./ημέρα) το pH επανήλθε στα επίπεδα της πρώτης μεταχείρισης (7,74).

Οι τιμές αυτές είναι υψηλότερες από εκείνες που αναφέρονται σε προηγούμενες μελέτες, όπου τα συστήματα λειτουργούσαν με γλυκό νερό ή με υφάλμυρο νερό. Οι Somerville et al., (2014) ανέφεραν τιμές pH μεταξύ 6,5 και 6,6, τιμές οι οποίες ήταν μικρότερες από τις τιμές pH του παρόντος πειράματος. Οι Stathopoulou et al., (2018), σε συγκαλλιέργεια μαρουλιού και ευρωπαϊκού λαβρακιού, αναφέρουν εύρος τιμών της τάξης 6,75–6,77 μικρότερο από τις τιμές του παρόντος πειράματος. Αντίστοιχα, οι Vlahos et al., (2019) και Vlahos et al., (2021), αναφέρουν υψηλότερες τιμές, από 7,54 έως 7,73 σε συστήματα ενυδρείοπονίας με καλλιέργεια τσιπούρας και κρίταμο συγκριτικά με τις τιμές του παρόντος πειράματος.

Η σταθερή πορεία του pH (7,74–7,86) που καταγράφηκε στο παρόν πείραμα αποτελεί ένδειξη ισορροπημένης λειτουργίας του συστήματος, καθώς βρίσκεται εντός των βέλτιστων ορίων τόσο για τα εκτρεφόμενα ψάρια όσο και για τους νιτροποιητικούς μικροοργανισμούς (Timmons & Ebeling, 2010; Chen et al., 2006; Somerville et al., 2014). Η αποτελεσματικότητα της νιτροποίησης μειώνεται αισθητά σε τιμές pH μικρότερες από 7, γεγονός που καθιστά το παρατηρούμενο εύρος ιδανικό για την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα (Ebeling et al., 2006).

Η υψηλότερη τιμή βρέθηκε στη μεταχείριση 5% του ζ.β./ημέρα που πιθανά να συνδέεται με την αυξημένη πρόσληψη τροφής η οποία συνεπάγεται αύξηση της αμμωνίας, η οποία μέσω της νιτροποίησης παράγει ιόντα HCO_3^- , που επηρεάζουν σημαντικά το pH προκαλώντας αύξηση της τιμής του. Αντίθετα, η σταθερή τιμή του pH στη μεταχείριση 7% του ζ.β./ημέρα πιθανά να αποδίδεται στην υπερφόρτωση του συστήματος που οδήγησε σε περιορισμό της δραστηριότητας των νιτροποιητικών βακτηρίων ή στην κατανάλωση CO_2 από τα φυτά.

Οι τιμές της TAN στο παρόν πείραμα δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p > 0,05$), κυμαινόμενες από $0,87 \pm 0,01$ mg/L (2% ζ.β/ημέρα), $0,88 \pm 0,05$ mg/L (5% ζ.β/ημέρα) έως $0,91 \pm 0,01$ mg/L (7%).

Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες από εκείνες που αναφέρουν οι Stathopoulou et al., (2018), οι οποίοι κατέγραψαν TAN από 0,12 έως 0,16 mg/L. Αντίστοιχα, οι Vlahos et al., (2023) αναφέρουν TAN που διακυμάνθηκαν από 0,24 έως 0,30 mg/L στα ενυδρειοπονικά συστήματα με επίπεδο διατροφής 5% του ζ.β/ημέρα οι οποίες ήταν αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές της παρούσας μελέτης. Η αύξηση της TAN αποδίδεται στα υψηλότερα επίπεδα σίτισης ιδίως στις μεταχειρίσεις με επίπεδο σίτισης 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα καθώς και στην αδυναμία του συστήματος (λόγω αυξημένου pH ή μειωμένης ικανότητας των φυτών) να οξειδώσουν πλήρως το παραγόμενο άζωτο (Timmons και Ebell 2010).

Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν ως προς τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μεταχείριση 2% του ζ.β/ημέρα παρουσίασε τη χαμηλότερη συγκέντρωση NO_3^- στην είσοδο ($60,00 \pm 3,54$ mg/L) και στην έξοδο ($20,83 \pm 5,23$ mg/L) του νερού από τις υδροπονικές δεξαμενές καλλιέργειας των μαρουλιών, ενώ οι μεταχειρίσεις 5% και 7% του ζ.β/ημέρα εμφάνισαν υψηλότερες τιμές στην είσοδο ($72,50 \pm 7,50$ και $73,75 \pm 6,25$ mg/L αντίστοιχα) και στην έξοδο ($22,50 \pm 7,83$ και $48,33 \pm 1,46$ mg/L αντίστοιχα) των υδροπονικών υποσυστημάτων καλλιέργειας του μαρουλιού. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρουσίασαν τα νιτρικά ιόντα στη έξοδο του από την υδροπονική δεξαμενή (ANOVA, $p < 0,05$), με τη μεταχείριση 7% του ζ.β/ημέρα να εμφανίζει αξιοσημείωτη συσσώρευση νιτρικών.

Οι τιμές των νιτρικών ιόντων είναι παρόλα αυτά εντός του εύρους τιμών (80–100 mg/L) που αναφέρονται από τους Timmons & Losordo (2000) για τα εκτρεφόμενα είδη ψαριών. Επιπλέον, όπως αναφέρουν οι Spotte (1992) και Somerville et al., (2014), τα υψηλά επίπεδα των νιτρικών σε συστήματα RAS υποδεικνύουν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και δεν αποτελούν πρόβλημα για το σύστημα.

Η απορροφητική ικανότητα του συστήματος σε νιτρικά ιόντα (NRE NO_3^-) διαφοροποιήθηκε σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Στη μεταχείριση 2% παρατηρήθηκε η υψηλότερη απόδοση απορρόφησης ($63,13 \pm 5,22\%$), η οποία μειώθηκε στις μεταχειρίσεις 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα ($56,67 \pm 6,66\%$ και $59,27 \pm 9,26\%$). Η μείωση αυτή υποδεικνύει ότι, παρότι η παραγωγή NO_3^- αυξάνεται με την προσφερόμενη τροφή, το σύστημα φτάνει σταδιακά σε κορεσμό ως προς την ικανότητά του να απορροφήσει επιπλέον άζωτο (Timmons & Ebeling 2010).

Χαμηλότερη απόδοση απορρόφησης επίσης, αναφέρεται από τους Al-Musawi et al., (2023), οι οποίοι καλλιέργησαν κυπρίνο (*Cyprinus carpio*) και μαρούλι (*Lactuca sativa*) σε σύστημα RAS, καταγράφοντας ποσοστά αξιοποίησης του αζώτου που κυμαίνονταν από 28,61% έως 33,95% χαμηλότερα ποσοστά απορρόφησης από την απορρόφηση που σημειώθηκε στο παρών πείραμα. Η διαφορά αυτή, ενδεχομένως να αποδίδεται σε διαφορετικά είδη φυτών, διαφορετικά επίπεδα αζωτούχου φορτίου που υπάρχει στο σύστημα καθώς και σε διαφοροποιημένες υδραυλικές ρυθμίσεις (π.χ. ρυθμός ροής, αερισμός, επιφάνεια ριζών κλπ).

Αντίστοιχα, τα ποσοστά απορρόφησης φωσφορικών ιόντων (NRE PO_4^{3-}) ήταν χαμηλότερα στις μεταχειρίσεις 2% και 5% ($45,0 \pm 3,16\%$ και $45,5 \pm 2,78\%$ αντίστοιχα), με την υψηλότερη απορρόφηση να σημειώνεται στη μεταχείριση 7% του ζ.β/ημέρα ($57,92 \pm 3,56\%$). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί σε αυξημένη φυτική ανάπτυξη λόγω μεγαλύτερης διαθεσιμότητας φωσφόρου ή σε διαφορετικό μεταβολικό ρυθμό φυτών-ψαριών (Rakocy et al., 2006; Tyson et al., 2011; Graber & Junge, 2009).

4.2. Βιοτικοί Παράγοντες

Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας έδειξαν ότι η επίδραση του διαφορετικού ποσοστού σίτισης επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη του κυπρίνου στα συστήματα ενυδρείοπονίας με ανακύκλωση νερού. Το καλύτερο τελικό βάρος (FBW), ο κυπρίνος το εμφάνισε στην μεταχείριση όπου διατράφηκε με 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα (ANOVA, $p < 0.05$), αντίστοιχα. Παρόμοια τάση σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης παρουσιάζουν οι δείκτες SGR (%/ημέρα) και η αύξηση του βάρους (WG), όπου παρατηρήθηκαν στατιστικά χαμηλότερες τιμές στη μεταχείριση όπου οι κυπρίνοι διατράφηκαν με το μικρότερο ποσοστό σίτισης (2% ζ.β/ημέρα) συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις 5% ζ.β/ημέρα και 7% ζ.β/ημέρα, όπου παρατηρήθηκε η βέλτιστη ανάπτυξη. Οι κυπρίνοι που διατράφηκαν με 7% ζ.β/ημέρα παρουσίασαν μεγαλύτερη ανάπτυξη.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη έδειξαν καλύτερο SGR στις μεταχειρίσεις 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα συγκριτικά με τη μεταχείριση 2% ζ.β/ημέρα. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα που αναφέρουν οι Cordelli et al. (2021) για τη μεταχείριση 4,9% ζ.β/ημέρα και ήταν στο 1,63%/ημέρα. Στην ίδια μελέτη επισημαίνεται ότι, η αύξηση του ποσοστού σίτισης δεν

οδηγεί σε αύξηση της ανάπτυξης, με τις πρακτικές διαχείρισης να αποτελούν το βασικό παράγοντα για την επιτυχημένη παραγωγική διαδικασία. Σύμφωνα με τους Cordelli et al., (2021) το βέλτιστο ποσοστό σίτισης εξαρτάται από το είδος του ψαριού, το μέγεθος του και τις συνθήκες εκτροφής.

Οι κυπρίνοι εμφανίζουν αυξημένο ρυθμό ανάπτυξης σε περιβάλλοντα με υψηλότερες θερμοκρασίες και παρατεταμένη διάρκεια της θερμής περιόδου, με τη μέγιστη αναπτυξιακή τους απόδοση να καταγράφεται σε περιοχές, όπου η θερμοκρασία του νερού παραμένει σταθερά άνω των 20°C καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (Al-Musawi et al. 2023).

Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν από τους Al-Humairi et al. (2020) για τον κοινό κυπρίνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες και λιπίδια με την αύξηση του επιπέδου σίτισης αναφέρθηκε επίσης από τους Porp et al., (2018), στην περίπτωση του *Acipenser stellatus* (οξύρρυγχος), ο οποίος τράφηκε με ποσοστά σίτισης 1% και 2% του σωματικού του βάρους ανά ημέρα.

Οι Desai και Singh (2009) αναφέρουν ότι ποσοστό σίτισης στο 6% του ζ.β/ημέρα ήταν το βέλτιστο ποσοστό σίτισης που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του γόνου του κυπρίνου σε θερμοκρασίες από 28°C έως 32°C. Ο Taher et al., (2023) αναφέρουν ότι, η θερμοκρασία του νερού επηρεάζει τον ημερήσιο ρυθμό σίτισης του κυπρίνου (grass carp) σε σύγκριση με το μέγεθος του ψαριού, σημειώνοντας ότι, οι υψηλότερες τιμές ημερήσιας κατανάλωσης τροφής και ποσοστών σίτισης καταγράφηκαν στους 25°C και 30°C, ενώ οι χαμηλότερες τιμές στους 10°C.

Οι Mohamed et al. (2024), βρήκαν ότι το υψηλότερο τελικό βάρος, η μεγαλύτερη αύξηση βάρους και ο μεγαλύτερος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης στην τιλάπια (*Oreochromis niloticus*) επιτεύχθηκε με ποσοστό σίτισης 7% του ζ.β/ημέρα σε θερμοκρασία 28°C. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν ότι η ανάπτυξη αυξανόταν τόσο με την αύξηση του επιπέδου σίτισης σε κάθε θερμοκρασία, όσο και με την αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε επίπεδο σίτισης. Στην παρούσα μελέτη, το βέλτιστο ποσοστό σίτισης για τον κυπρίνο προσδιορίστηκε στο 5% του ζ.β/ημέρα.

Επίσης ο συντελεστής ευρωστίας K_{fin} παρουσίασε στατιστικά μεγαλύτερη τιμή στις μεταχειρίσεις 5% του ζ.β/ ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα, αντίστοιχα σε σχέση με το μικρότερο ποσοστό σίτισης (2% του ζ.β/ημέρα). Τα ευρήματα της παρούσης μελέτης υποδηλώνουν ότι η αύξηση του επιπέδου σίτισης συμβάλλει θετικά στην ενίσχυση της ανάπτυξης. Υπέρβαση του σημείου όπου η τροφή είναι περισσότερη απ' ότι μπορούν τα ψάρια πραγματικά να μεταβολίσουν οδηγεί σε σπατάλη τροφής μειώνοντας τη

μετατρεψιμότητα της τροφής και δημιουργεί υποβάθμιση της ποιότητας του νερού εξαιτίας του περίσσιου οργανικού φορτίου.

4.3. Δείκτες αξιολόγησης και εκμετάλλευσης της τροφής

Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας έδειξαν στατιστικά καλύτερο FCR στην μεταχείριση 5% του ζ.β/ημέρα ($FCR: 1.07 \pm 0,05$) σε σχέση με τη μεταχείριση 2% του ζ.β/ημέρα που εμφάνισε μικρότερο FCR ($FCR: 0.33 \pm 0,01$) με την καλύτερη τιμή FCR να καταγράφηκε στο μεσαίο ποσοστό σίτισης (5% του ζ.β/ημέρα). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα που αναφέρονται από τους Cordelli et al., (2021) για τον κυπρίνο όταν σιτίζεται με το μικρότερο ποσοστό διατροφής (3%) σε σχέση με τα μεγαλύτερα.

Τα ευρήματα της παρούσης εργασίας έδειξαν ότι, ο συντελεστής απόδοσης των πρωτεϊνών (PER) παρουσίασε καλύτερη τιμή στις μεταχειρίσεις με συντελεστές σίτισης 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα.

Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην αποδοτικότητα μετατροπής της τροφής (FCR) και στον δείκτη αποδοτικότητας της πρωτεΐνης (PER) στα υψηλότερα ποσοστά σίτισης, γεγονός που αποτελεί ένδειξη απώλειας θρεπτικών συστατικών και σπατάλης τροφής. Οι κυπρίνοι κατανάλωναν περισσότερη τροφή χωρίς να αυξάνουν αντίστοιχα το βάρος τους στις μεταχειρίσεις με 7% του ζ.β/ημέρα και 5% του ζ.β./ημέρα. Στα μικρότερο ποσοστά σίτισης (2% του ζ.β/ημέρα) παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην αποδοτικότητα μετατροπής της τροφής (FCR) και αύξηση στον δείκτη αποδοτικότητας της πρωτεΐνης (PER), γεγονός που αποτελεί ένδειξη απώλειας θρεπτικών συστατικών και σπατάλης τροφής.

Οι Desai et al. (2009) μελέτησαν τέσσερα διαφορετικά ποσοστά σίτισης (4%, 5%, 6% και 7% του ζ.β/ημέρα) σε γόνο κοινού κυπρίνου με αρχικό βάρος 0,86 g και διαπίστωσαν ότι η βέλτιστη αποδοτικότητα μετατρεψιμότητας τροφής επιτεύχθηκε στο χαμηλότερο επίπεδο σίτισης (4% ζ.β/ημέρα). Αντίστοιχα, οι Al-Musawi et al., (2023) παρατήρησαν ότι η σίτιση του κοινού κυπρίνου με ποσότητες ελαφρώς μικρότερες από το επίπεδο κορεσμού, όπως το 90% και το 80% του σημείου κορεσμού, σε σύγκριση με τη σίτιση έως κορεσμού, οδήγησε σε ελαφρώς υψηλότερο δείκτη αποδοτικότητας τροφής (PER).

Ο εθελούσιος συντελεστής πρόσληψης της τροφής (VFI) καθώς και ο ημερήσιος συντελεστής τροφοληψίας (DFI) στατιστικά ήταν καλύτερος στις μεταχειρίσεις που σιτίστηκαν με 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα.

Σύμφωνα με τους Van Ham et al., (2003), τα ψάρια τείνουν να βελτιστοποιούν την πέψη τους και να συγκρατούν τα θρεπτικά συστατικά πιο αποτελεσματικά σε χαμηλότερα ποσοστά σίτισης, ενώ όταν συνεχίζουν να διατρέφονται, παρατηρείται σπατάλη τροφής και καταγράφεται αύξηση του δείκτη μετατρεψιμότητας τροφής (FCR) (Khan et al., 2004). Επιπλέον, οι Theodorakaki et al. (2021) αναφέρουν ότι η μείωση της ημερήσιας ποσότητας προσλαμβανόμενης τροφής φαίνεται να ωθεί τα ψάρια να αξιοποιούν καλύτερα τη διαθέσιμη τροφή.

4.4. Δείκτες ανάπτυξης μαρουλιού

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του ποσοστού χορήγησης τροφής στους ιχθύες και της παραγωγικότητας του μαρουλιού συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης των ενυδρειοπονικών συστημάτων. Στην παρούσα μελέτη, διερευνήθηκε η επίδραση τριών επίπεδων σίτισης (2% του ζ.β/ημέρα 5% του ζ.β/ημέρα και 7% του ζ.β/ημέρα), αποκαλύπτοντας μια μη γραμμική σχέση μεταξύ ποσότητας τροφής και παραγωγικότητας του μαρουλιού (*Lactuca sativa*).

Η μέγιστη τιμή παραγωγικότητας καταγράφηκε στο 5% ζ.β./ημέρα (18.94 ± 3.15 gr/m²), ενώ η αύξηση που συντελέστηκε στο 7% δεν οδήγησε σε σημαντική αύξηση της παραγωγής (17.01 ± 1.65 gr/m²), παρότι υπήρξε αύξηση του τελικού ύψους του φυτού (14.63 cm). Αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη σημείου κορεσμού όπου, το μαρούλι από ένα χρονικό σημείο και έκτοτε δεν μπορεί να αξιοποιήσει επιπλέον τα θρεπτικά συστατικά και η οποία πιθανά να αποδίδεται στον ανταγωνισμό, είτε λόγω έλλειψης χρονικής ή φυσιολογικής δυνατότητας του φυτού να προσροφήσει περισσότερο) και να εμφανίζει σημάδια θρεπτικής ανεπάρκειας (Roosta, & Hamidpour, 2011, Kawser et al., 2020).

Παρόμοια ευρήματα αναφέρονται από τους Kawser et al., (2020), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι σε σύστημα ανακύκλωσης νερού με πυκνότητα εκτροφής 100 ιχθύδια/m³, η μέγιστη φυτική παραγωγή (2.2 kg/m²) επετεύχθη με πυκνότητα φύτευσης 25 φυτά/m². Παρατηρήθηκε επίσης ότι, η περαιτέρω αύξηση της φυτευτικής πυκνότητας

δεν βελτίωσε την παραγωγή, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των θρεπτικών συστατικών. Αντίστοιχα, στην παρούσα μελέτη, η μετάβαση από το 5% στο 7% ζ.β/ημέρα. αύξησε ελαφρώς τη μάζα ανά φυτό (Win), αλλά δεν αύξησε την απόδοση του συστήματος συνολικά, επαναβεβαιώνοντας τη σημασία του ισοζυγίου μεταξύ προσφερόμενης και αξιοποιήσιμης θρέψης.

Προηγούμενες μελέτες (Rakocy et al. 2006, Nichols & Savidon 2012,) αναφέρουν ότι, η προσθήκη 60 g τροφής ανά m² επιφάνειας σε ημερήσια βάση οδηγεί στην επαρκή παροχή θρεπτικών για τα φυτά. Εντούτοις, η παρούσα μελέτη δείχνει ότι ο καθορισμός του λόγου της τροφής ενδέχεται να υπερέχει σε αποτελεσματικότητα, καθώς η υψηλότερη παραγωγή επιτεύχθηκε με το επίπεδο διατροφής 5% ζ.β/ημέρα και όχι με το υψηλότερο συντελεστή διατροφής (7% του ζ.β/ημέρα).

Επιπλέον, τα ευρήματα της συγκεκριμένης εργασίας συμφωνούν με εκείνα που αναφέρονται από τους Delaide et al., (2018), όπου η ανάπτυξη του μαρουλιού σε συστήματα ενυδρειοπονίας παρέμειναν ιδιαίτερα χαμηλές (~37 g/φυτό) όταν η συνολική εισροή των θρεπτικών ήταν χαμηλή, ενώ η χρήση υβριδικών ή ενισχυμένων συστημάτων οδήγησε σε αισθητά καλύτερες επιδόσεις.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν την σημαντικότητα προσδιορισμού της συχνότητας σίτισης στα συστήματα ενυδρειοπονίας, με επίπεδο διατροφής 5% ζ.β./ημέρα να επιφέρει την ισορροπία μεταξύ βιομάζας, κόστους και απόδοσης. Η αύξηση της ποσότητας τροφής μεγαλύτερη από 5% του ζ.β/ημέρα δεν φαίνεται να βελτιώνει περαιτέρω την παραγωγικότητα του μαρουλιού. Αντίθετα, υπάρχει ο κίνδυνος να επιβαρυνθεί το σύστημα με υπερβολικά θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο και φώσφορο, τα οποία αν δεν απορροφηθούν επαρκώς από τα φυτά, θα υποβαθμίσουν την ποιότητα του νερού και θα προκαλέσαν προβλήματα διαχείρισης στο σύστημα.

4.5. Παράμετροι απόδοσης του φίλτρου

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καταδεικνύουν ότι η αύξηση του ημερήσιου ποσοστού τροφής (% του ζ.β/ημέρα) επηρεάζει σημαντικά τόσο τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας (P_{TAN}), όσο και τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα (VTR) και το ρυθμό απορρόφησης των νιτρικών ιόντων στα υδροπονικά υποσυστήματα καλλιέργειας του μαρουλιού.

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (P_{TAN}) ήταν στατιστικά 2 φορές περίπου μεγαλύτερος στη μεταχείριση με τον υψηλότερο ποσοστό χορήγησης τροφής (7 % του ζ.β/ημέρα) σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις 2% του ζ.β/ημέρα και 5% του ζ.β/ημέρα, αντίστοιχα (ANOVA, $p < 0.05$) ερμηνεύοντας τον ασφαλή τρόπο λειτουργίας του συστήματος.

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (P_{TAN}), ήταν μικρότερος από τις τιμές που αναφέρουν η Τάσιου (2019) και Οι Vlahos et al. (2023) (P_{TAN} : $2,79 \pm 0,34$ - $3,03 \pm 0,45$ mg/L) σε αντίστοιχο πείραμα που διεξήχθη σε ενυδρειοπονικό σύστημα με λαβράκι και κρίταμο σε αλατότητες 8 ppt, 14 ppt & 20 ppt. Οι Μαρδόγλου και συν., (2022), αναφέρουν μικρότερες τιμές P_{TAN} στο υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας καλλιέργειας λαβρακιού και ρόκας σε αλατότητες 1,5ppt, 5 ppt & 7 ppt.

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας εξαρτάται από την συχνότητα ταΐσματος και το ποσοστό σίτισης (% του ζ.β/ημέρα) και ερμηνεύεται ως η ημερήσια παραγόμενη συγκέντρωση της TAN στο σύστημα (Timmons & Losordo 2000).

Σε ότι αφορά τον όγκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας (VTR, g TAN/m³/ημέρα) στο φίλτρο παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις. Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας δεν συμφωνούν με εκείνα που αναφέρουν οι Kumar et al., (2010) οι οποίοι μελέτησαν το ρυθμό νιτροποίησης (Chen & Blancheton, 2006) σε υφάλμυρο σύστημα RAS και βρήκαν VTR 0.1533 ± 0.0045 kg TAN/m³/ημέρα, μικρότερο από το VTR του παρόντος πειράματος. Επίσης, οι Μαρδόγλου και συν., (2022) αναφέρουν τιμές VTR σε ενυδρειοπονικό σύστημα ενυδρειοπονίας καλλιέργειας ρόκας και λαβρακιού σε αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt & 7 ppt, μικρότερες ($1.38 \pm 0,23$ g TAN/m³/ημέρα, $1,19 \pm 0,22$ g TAN/m³/ημέρα και $1,23 \pm 0,32$ g TAN/m³/ημέρα) από τις τιμές του παρόντος πειράματος.

Η αποδοτικότητα του φίλτρου επηρεάζεται από τις παραμέτρους λειτουργίας, το ρυθμό παραγωγής αμμωνίας και τον όγκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας (VTR). Σύμφωνα με τους Spotte (1992) και Adhikari et al., (2020), η αύξηση της συγκέντρωσης του ολικού αμμωνιακού αζώτου (TAN) εντός του φίλτρου ενισχύει την οξειδωτική του δραστηριότητα (VTR), γεγονός που με τη σειρά του προάγει την απορρόφηση των νιτρικών ιόντων στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Όσον αφορά την απορρόφηση των νιτρικών ιόντων (NO_3^- retained), παρατηρήθηκε η υψηλότερη απόδοση να επιτυγχάνεται στη χαμηλότερη ποσότητα τροφής (2% του ζ.β/ημέρα) που χορηγείται στο σύστημα ενυδρειοπονίας, με σημαντική μείωση στο 5%. Το εύρημα αυτό

ενισχύει την άποψη πως η υπερβολική τροφή οδηγεί σε μειωμένη συγκράτηση των τελικών προϊόντων της νιτροποίησης από το σύστημα, ενδεχομένως λόγω ταχύτερης απορροής ή κορεσμού του υποστρώματος.

Όπως αναφέρουν οι Endut et al., (2010), η λειτουργική απόδοση ενός συστήματος ενυδρειοπονίας επηρεάζεται από παράγοντες όπως το υδραυλικό φορτίο (HLR), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στο φίλτρο (HRT), ο ρυθμός ανακυκλοφορίας του νερού (r) και η αποδοτικότητα του φίλτρου (E). Παράλληλα, η οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου επηρεάζεται από τον ρυθμό παραγωγής αμμωνίας (P_{TAN}), τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας (VTR), το φορτίο επιβάρυνσης με άζωτο (N), καθώς και από τις μεταβολές της συγκέντρωσης της αμμωνίας στα υδροπονικά υποσυστήματα ανάπτυξης φυτών (TAN) (Kamstra et al., 1998, Adhikari et al., 2020).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο καθορισμός του κατάλληλου επιπέδου σίτισης είναι καθοριστικός για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της τεχνολογικής και οικονομικής απόδοσης της εκτροφής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία εστιάζουν στα παρακάτω:

- το βέλτιστο ποσοστό σίτισης για τον κυπρίνο *Cyprinus carpio* (με ατομικό βάρος από 3,65 gr) ήταν στο 5% και 7% του ζ.β./ημέρα.
- η αύξηση του επιπέδου διατροφής από 2% σε 7% του ζ.β./ημέρα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του P_{TAN} , υποδηλώνοντας μεγαλύτερο φορτίο αζώτου και εντονότερη παραγωγή μεταβολικών αποβλήτων.
- η απορρόφηση των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) ήταν υψηλότερη στα επίπεδα διατροφής 2% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα και χαμηλότερη στο 5% του ζ.β./ημέρα, γεγονός που δείχνει ότι, το μεσαίο επίπεδο διατροφής (5% του ζ.β./ημέρα) δεν εξασφαλίζει απαραίτητα τη βέλτιστη λειτουργία.
- η διατροφή στο 5% του ζ.β./ημέρα, αν και θεωρείται βέλτιστη για την ανάπτυξη των ιχθύων, δεν επέφερε την καλύτερη λειτουργία του συστήματος ενυδρειοπονίας, ούτε ως προς την αποδοτικότητα του φίλτρου ούτε ως προς την απορρόφηση των νιτρικών ιόντων.
- οι διατροφικές στρατηγικές 2% του ζ.β./ημέρα και 7% του ζ.β./ημέρα προσφέρουν καλύτερη δυναμική απόδοσης, ανάλογα με το στόχο της καλλιέργειας (π.χ. μέγιστη φυτική ή ιχθυοπαραγωγή).
- η αύξηση του ποσοστού σίτισης δεν οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της αναπτυξιακής απόδοσης του κοινού κυπρίνου.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Adhikari. R., Rauniyar. S., Pokhrel. N., Wagle. A., Komai. T., Paudel. S.R. (2020). Nitrogen recovery via aquaponics in Nepal: current status, prospects, and challenges. *SN Applied Sciences* 2:1192. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2996-5>
- Al-Humairi, K. O. M., Al-Tameemi, R. A., & Al-Noor, S. S. (2020). Growth Performance and Feed Efficiency Assessment of Two Groups of Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) Cultivated in Iraq. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 33(1), 189. <https://doi.org/10.37077/25200860.2020.33.1.14>
- Aljehani, F., N'Doye, I., & Laleg-Kirati, T. (2023). Feeding control and water quality monitoring in aquaculture systems: Opportunities and challenges. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2306.09920>
- Al-Musawi A. W., Muhammed S.J., Othman N.R., and AL-Amery A. A. A. (2023). Effect of Temperature on Feed Intake and Feeding Ratio of Common Carp (*Cyprinus carpio*) Under Laboratory Conditions. *BAER*, Vol. 7(2): 142-148, 2023, <https://doi.org/10.51304/baer.2023.7.2.143>.
- Barari, A., Sorki, P., & Nazari, R. M. (2016). Comparison of Effects of Different Enzymic Levels Immnowall and Premalac Indices of Growth, Survival Rate and Body Composition in *Cyprinus carpio*. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(4), 1199. <https://doi.org/10.21275/v5i4.15041601>
- Bordignon, F. (2020). Farming largemouth bass (*Micropterus salmoides*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and radicchio (*Cichorium intybus*) in aquaponics: effects of stocking density on fish growth and quality, and vegetable production. *Acta Fytotechnica et Zootechnica/Acta Fytotechnica et Zootechnica*, 23, 79. <https://doi.org/10.15414/afz.2020.23.mi-fpap.79-87>
- Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., & Yi, Y. (2017). The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering*, 78, 146. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002>

- Chakrabarti, R., & Jana, B. B. (1991). Growth induction of common carp, *Cyprinus carpio* L., fry as a function of plankton density and improved water quality. *Aquaculture Research*, 22(3), 295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1991.tb00519.x>
- Chen, S., Ling, J., & Blancheton, J. P. (2006). Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.002>.
- Cordeli (Săvescu) A.N., Oprea, M., Crețu M, Mocanu M. (2021). Effects of feeding level on growth performance and body composition of common carp (*cyprinus carpio*, Linnaeus, 1758) in recirculating aquaculture systems rearing. Scientific Papers. Series D. Animal Science. Vol. LXIV, No. 2, 2021. ISSN 2285-5750; ISSN CD-ROM 2285-5769; ISSN Online 2393-2260; ISSN-L 2285-5750
- Dawood, M. A. O., & Koshio, S. (2015). Recent advances in the role of probiotics and prebiotics in carp aquaculture: A review [Review of Recent advances in the role of probiotics and prebiotics in carp aquaculture: A review]. *Aquaculture*, 454, 243. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.12.033/>
- Delaide, B., Goddek, S., Keesman, K. J., & Jijakli, M. H. (2018). A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 22(2), 106–112. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.16406>
- Desai, A. S., & Singh, R. K. (2009). The effects of water temperature and ration size on growth and body composition of fry of common carp, *Cyprinus carpio*. *Journal of Thermal Biology*, 34(6), 276. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2009.03.005>
- Dragomir, E., & Doltu, M. (2022). Recirculating aquaponic system on dwc type floatable support at icdimph – hortling. *Current trends in natural sciences*, 11(21), 118. <https://doi.org/10.47068/ctns.2022.v11i21.012>
- Du Z-Y, Liu Y.J., Tian L.X, He J.G. Cao J.M and Liang G.Y.(2006). The influence of feeding rate on growth, feed efficiency and body composition of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquaculture International* (2006) 14:247. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-9029-7257>.
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 344–360. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.006>

- El-Hack, M. E. A., El-Saadony, M. T., Nader, M. M., Salem, H. M., El-Tahan, A. M., Soliman, S. M., & Khafaga, A. F. (2022). Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [Review of Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)]. *International Journal of Biometeorology*, 66(11), 2183. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02347-6>
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan-Nik W., Hassan A., (2010). A Study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour. Technol.* 101: 1511- 1517.
- Estim, A., Shaleh, S. R. M., Shapawi, R., Saufie, S., & Mustafa, S. (2020). Maximizing Efficiency and Sustainability of Aquatic Food Production from Aquaponics Systems - A Critical Review of Challenges and Solution Options [Review of Maximizing Efficiency and Sustainability of Aquatic Food Production from Aquaponics Systems - A Critical Review of Challenges and Solution Options]. *Aquaculture Studies*, 20(1). https://doi.org/10.4194/2618-6381-v20_1_08
- Ghamkhar, R., Hartleb, C., Wu, F., & Hicks, A. (2019). Life cycle assessment of a cold weather aquaponic food production system. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118767>.
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1–3), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Hussein, M. S., ELzayat, A., & AdelBauomi, M. (2020). Study of the effects of different monosex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings densities on Lettuce (*Lactuca sativa*) and water quality in a low-tech recirculation aquaponic system. *International Journal of Development*, 9(1), 11. <https://doi.org/10.21608/ij.2020.74591>.
- Kamstra A., van der Heul J W., Nijhof M. (1998). Performance and optimisation of trickling filters on eel Farms, *Aquacultural Engineering* 17 (1998) 175–192.
- Khan M. Ajmal, Bilquees Gul & Darrell J. Weber (2004) Germination responses of *Salicornia rubra* to temperature and salinity Department of Botany, University of Karachi, Karachi-75270, Pakistan - Department of Botany and Range Science, Brigham Young University, Provo, Utah 84602-5181, U.S.A.
- Kovalenko, M. V., & Krasilnikova, A. A. (2021). Study of the use of compound feeds in the cultivation of koi carp *Cyprinus carpio haematopterus*. *IOP Conference Series Earth*

- and Environmental Science, 839(4), 42018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042018>.
- Kumar V. J. R., Joseph, V, Philip., R., I. S. B. Singh (2010).| Nitrification in brackish water recirculating aquaculture system integrated with activated packed bed bioreactor. Water Science & Technology-WST. 61.3. doi: 10.2166/wst.2010.849.
- Liddicoat, M.I., Tibhitts, S., & Butler, E.I. (1975). The determination of ammonia in seawater. Limnology and Oceanography, 20(1), 131-132.
- Maucieri, C. (2019). Low-tech aquaponic production of European carp and leafy vegetables. <https://www.globalseafood.org/advocate/low-tech-aquaponic-production-of-european-carp-and-leafy-vegetables/>
- Mihály-Karnai, L., Fehér, M., Bársony, P., Szűcs, I., Mihály, T., Fróna, D., & Szöllősi, L. (2025). Sustainability in Intensive Aquaculture—Profitability of Common Carp (*Cyprinus carpio*) Production in Recirculating Aquaculture Systems Based on a Hungarian Case Study. Animals, 15(7), 1055. <https://doi.org/10.3390/ani15071055>.
- Mohamed, A. A., Ibrahim, R. E., & Hassan, M. E. (2024). Interactive effects of water temperature and dietary protein level on growth performance and feed utilization in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). BMC Veterinary Research, 20(1), Article 198. <https://doi.org/10.1186/s12917-024-04198-2>
- Nichols, M., & Savidov, N. (2012). AQUAPONICS: PROTEIN AND VEGETABLES FOR DEVELOPING COUNTRIES. Acta Horticulturae, 958, 189. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.958.22>.
- Nuwansi, K. K. T., Verma, A. K., Chandrakant, M. H., Prabhath, G. P. W. A., & Peter, R. M. (2020). Optimization of stocking density of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) with gotukola (*Centella asiatica*) in an aquaponic system using phytoremediated aquaculture wastewater. Aquaculture, 532, 735993. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735993>.
- Popp, J., Váradi, L., Békefi, E., Péteri, A., Gyalog, G., Lakner, Z., & Oláh, J. (2018). Evolution of Integrated Open Aquaculture Systems in Hungary: Results from a Case Study. Sustainability, 10(1), 177. <https://doi.org/10.3390/su10010177>.
- Rahman, M. M. (2015). Role of common carp (*Cyprinus carpio*) in aquaculture production systems. Frontiers in Life Science, 8(4), 399. <https://doi.org/10.1080/21553769.2015.1045629>
- Rahmat, R. W. O. K., & Nazir, S. (2020). Urban aquaponics farming and cities- a systematic literature review [Review of Urban aquaponics farming and cities- a systematic

- literature review]. *Reviews on Environmental Health*, 36(1), <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0064>.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture (SRAC Publication No. 454). Southern Regional Aquaculture Center. Retrieved from <https://srac.tamu.edu/index.cfm/event/getFactSheet/whichfactsheet/105/>
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of nutrient solutions' pH and EC on the vegetative growth, yield and macro–element concentrations in tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 34(4), 640–647. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.538125>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf>
- Spotte S., (1992). *Captive Seawater Fishes*. John Wiley & Sons, New York. 942pp.
- Stathopoulou, P., Berillis, P., Levizou, E., Sakellariou-Makrantonaki, M., AK, K., Aggelaki, A., Kapsis, P., Vlahos, N., & Mente, E. (2018). Basil and Nile tilapia Production in a Small Scale Aquaponic System. *Journal of Fisheries Sciences Com*, 12(4). <https://doi.org/10.21767/1307-234x.1000152>
- Taher, M. M., Muhammed, S. J., Salih, O. A., Al-Dubakel, A. Y., & Mojer, A. M. (2023). Effect of feeding ratio on the growth of common carp cultivated in earthen ponds. *IRAQI JOURNAL OF AQUACULTURE*, 20(2), 193. <https://doi.org/10.58629/ijaq.v20i2.486> .
- Tasleem, S., Alotaibi, B. S., Masud, S., Habib, S. S., Acar, Ü., Gualandi, S., Ullah, M., Khan, K., Fazio, F., & Khayyam, K. (2024). Biofloc System with Different Carbon Sources Improved Growth, Haematology, Nonspecific Immunity, and Resistivity against the *Aeromonas hydrophila* in Common Carp, *Cyprinus carpio*. *Aquaculture Research*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/7652354>
- Theodorakaki E., Papadakis G., Kaloussias S., Mente E., Vlahos N., (2021). Leaping grey mullet *Liza saliens* as an alternative and candidate fish species to be used in a brackish aquaponic system cocultivated with rocket plant *eruca sativa*. *Hydromedit* 2021.
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating aquaculture* (2nd ed.). Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures. recirculating aquaculture system integrated with activated packed bed bioreactor. *Water Science & Technology-WST*. 61.3. doi: 10.2166/wst.2010.849.

- Timmons., B.M., Losordo. M.T., (2000). *Aquaculture water reuses systems: Engineering Design and Management*. Elsevier Science B.V. Amsterdam, the Netherlands. Pp.333. ISBN: 0-444- 89585-X.
- Tsoumalakou, E.; Mente, E.; Vlahos, N.; Levizou, E (2023). 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>
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6–13. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6>
- Van Ham, E., Berntssen, M. H. G., Imsland, A. K., Parpoura, A. C., Stefansson, S. O., & Waagbø, R. (2003). The influence of temperature and ration on growth, feed conversion, body composition and nutrient retention of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*). *Aquaculture*, 217(1–4), 547–558. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00465-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00465-9)
- Vlahos N, Levizou E, Patsea E, Tasiou K, Berillis P, Antonopoulou E, Bekiari V, Martou N, Morfesis K, Lazari D, Chatzimavroudis C.S, Krigas N, Kormas K, Mente E. (2023). Salinity affects the efficiency of a brackish aquaponics system of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and rock samphire (*Crithmum maritimum*), *Aquaculture*, 571,1-13.
- Vlahos N., Ioannidis. J., Devetzoglou K., Hotos G., Vidalis K., Mente E, (2021). Growth Performance Of Seabass (*Dicentrarchus labrax*) and Rocket Plant (*Eruca sativa*) in A Brackish Aquaponics System Using The Nutrient Film Technique (NFT). Hydromedit 2021.
- Vlahos N., Levizou E., Stathopoulou P., Berillis P., Antonopoulou E., Bekiari V., Krigas N., Kormas K., and Mente E. (2019). An Experimental Brackish Aquaponic System Using Juvenile Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) and Rock Samphire (*Crithmum maritimum*). *Sustainability* 11(18). DOI: 10.3390/su11184820.
- Wu, W., Ji, H., Yu, H., Sun, J., & Zhou, J. (2020). Effect of refeeding dietary containing different protein and lipid levels on growth performance, body composition, digestive enzyme activities and metabolic related gene expression of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) after overwinter starvation. *Aquaculture*, 523, 735196. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735196>

- Xu, L., Ziethen, C. J., Appelbaum, S., Palm, H. W., & Knaus, U. (2022). Aquaponics Production of Wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) in Different Horticultural Substrates with African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Northern Germany. *AgriEngineering*, 4(4), 1076. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040067>
- Zainal, A. G., Yulianto, H., Lukman, R., & Yanfika, H. (2021). Financial benefits of the environmentally friendly aquaponic media system. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 739(1), 12024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012024>
- Zar J. (1999). H. *Biostatistical Analysis*; Prentice-Hall: London,UK., (1999); P. 718.

6.2. Ελληνική Βιβλιογραφία

- Μαρδόγλου Ε, Αναστασιάδης Α, Κουτράκης Ι, Κουλοπούλου Χ.Ε, Στέφα Ζ.Α, Περτέση Μ, Φουσέκης Ν, Μεντέ Ε και Βλάχος Ν. (2022). Η επίδραση του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας (VTR) στην απόδοση και λειτουργία ενός συστήματος ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό. 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ιχθυολόγων Μεσολόγγι 3 - 6 Νοεμβρίου 2022, σελ 458-462.
- Τάσιου Κ. (2019). *Παραγωγική διαδικασία λαβρακιού σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας*. Μεταπτυχιακή διπλωματική Διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας σελ 84.
- Φιλίντα Β. (2024). Μελέτη κατανάλωσης της τροφής του λαβρακιού (*Direntrarchus labrax*) σε σύστημα ενυδρειοπονίας με διαφορετικές θερμοκρασίες. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών 66 σελ.