

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

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ισοζύγιο μάζας της αμμωνίας σε ένα πολυτροφικό ενυδρειοπονικό
σύστημα υφάλμυρου νερού»**

Παπαγεωργίου Άννα

ΒΟΛΟΣ 2024

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

POSTGRADUATE COURSE IN MEDITERRANEAN AQUACULTURE

POSTGRADUATE MASTER'S THESIS

« Ammonia mass balance in a polyculture brackish aquaponic systems »

Papageorgiou Anna

VOLOS 2024

«Ισοζύγιο της μάζας της αμμωνίας σε ένα πολυτροφικό ενυδρειοπονικό σύστημα υφάλμυρου νερού»

Τριμελής Συμβουλευτική Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) **Καραπαναγιωτίδης Ιωάννης**, Αναπληρωτής Καθηγητής (MSc, PhD), Διατροφή Υδρόβιων Ζωϊκών Οργανισμών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπων**.
- 2) **Ελένη Μεντέ**, Καθηγήτρια, Φυσιολογία Θρέψης Υδρόβιων Ζωϊκών Οργανισμών, Τμήμα Κτηνιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, **Μέλος**
- 3) **Νικόλαος Βλάχος**, Ε.ΔΙ.Π., Φυσιολογία θρέψης Υδρόβιων Οργανισμών στην Ενυδρειολογία και Ενυδρειοπονία. Τμήμα Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών, **Μέλος**.

***Αφιερωμένη
στην οικογένειά μου***

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους τους ανθρώπους που συνέλαβαν στην ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ιωάννη Καραπαναγιωτίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή (MSc, PhD), Διατροφής Υδρόβιων Ζωϊκών Οργανισμών του Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας για την αμέριστη βοήθεια και την συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους Ελένη Μεντέ, Καθηγήτρια του Τμήματος Κτηνιατρικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και Δρ. Νικόλαο Βλάχο, Ε.ΔΙ.Π., με γνωστικό αντικείμενο Φυσιολογίας θρέψης Υδρόβιων Οργανισμών στην Ενυδρειολογία και Ενυδρειοπονία του Τμήματος Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών, του Πανεπιστημίου Πατρών, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για την αμέριστη και ανιδιοτελή βοήθεια, την συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της πειραματικής διαδικασίας ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων, καθώς και συγγραφή της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους Ιωάννη Μητσόπουλο και Κωνσταντίνο Μπαμπουκλή, υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος για την άμεση και ανιδιοτελή βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την διεξαγωγή του πειράματος τους καθώς και τη Ηλιάννα Κοντού, μεταπτυχιακή φοιτήτρια του τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής του πειραματικού μέρους της εργασίας καθώς και ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους, τόσο κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου όσο και κατά τη διάρκεια περάτωσης της παρούσης διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πολυτροφικά συστήματα ενυδρειοπονίας με ανακύκλωση νερού αφορούν την εκτροφή διάφορων υδρόβιων οργανισμών και την ανάπτυξη φυτικών οργανισμών, αποσκοπώντας στη παραγωγή βιοασφαλών τροφίμων. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η επίδραση πειραμάτων αντιστάθμισης του σιτηρεσίου (ασιτία–επανασίτιση) στο ισοζύγιο μάζας της αμμωνίας σε ενυδρειοπονικά συστήματα πολυκαλλιέργειας τσιπούρας (*Sparus aurata*), λαβρακιού (*Dicentrarchus labrax*) και του αλόφυτου σαλικόρνια (*Salicornia europaea*) για 75 ημέρες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν εννέα αυτόνομα συστήματα ενυδρειοπονίας με ανακύκλωση νερού αλατότητας 12 ppt, συνολικού όγκου 95,8 L, τα οποία διαχωρίστηκαν ανά τρία σε τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις (μεταχείριση Α: καθημερινή σίτιση, μεταχείριση Β: 4 ημέρες ασιτία και επανασίτιση 3 ημέρες, μεταχείριση Γ: ασιτία 7 ημέρες και επανασίτιση 7 ημέρες).

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 90 ιχθύδια τσιπούρας και 90 ιχθύδια λαβρακιού τα οποία διαμοιράσθηκαν ανά 10 άτομα/είδος (20 άτομα συνολικά/σύστημα) στις ενυδρειοπονικές δεξαμενές εκτροφής. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν 45 άτομα σαλικόρνιας (5 άτομα/υδροπονική δεξαμενή).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όταν στα ψάρια του πειράματος εφαρμόζονταν ασιτία 4 και 7 ημερών, το σύστημα είχε μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με εκείνα ημερήσιας σίτισης. Επιπλέον η απορρόφηση των νιτρικών ιόντων από τα φυτά και ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας, ήταν μεγαλύτερος στα συστήματα που εφαρμόζονταν μερική και μεγαλύτερη ασιτία. Μεγαλύτερη στατιστικά αποδοτικότητα του φίλτρου και μεταβολή της αμμωνίας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση των τεσσάρων ημερών ασιτίας. Αντίθετα, στα συστήματα όπου τα ψάρια σιτίζονταν καθημερινά, ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας ήταν μεγαλύτερος. Τέλος, η μερική ασιτία στα ψάρια μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στην λειτουργία των συστημάτων πολυκαλλιέργειας και μεγάλα κέρδη στους εκτροφείς.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδρειοπονία σε πολυκαλλιέργεια, ανάπτυξη αντιστάθμισης, *Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax*, *Salicornia europaea*

ABSTRACT

Polytrophic aquaponic systems with water recycling involve the breeding of various aquatic organisms and the growth of plant organisms, with the aim of producing bio-safe food. The aim of the present study was to investigate the effects of starvation and refeeding on ammonia mass balance of aquaponic systems co-cultivated gilthead sea bream (*Sparus aurata*), sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and *Salicornia europaea* over 75 days in a polyculture aquaponics system with brackish water.

The experiment was conducted using nine autonomous recirculating aquaponic systems, each with a total volume of 95.8 L. These systems were divided into three treatments: treatment A (daily feeding), treatment B (4 days starvation and refeeding three days), and treatment C (7 days starvation and refeeding seven days). The experiment was carried out in a brackish polyculture aquaponic system with 12 ppt salinity.

A total of 90 juvenile sea bream and 90 juvenile sea bass were used and distributed among 10 individuals/species/tank (total 20 individuals/system). In addition, 45 *Salicornia* plants were distributed among 5 individuals per hydroponic tank.

The results showed that, when the experimental fish were starved for 4 and 7 days, the system performed better than those fed daily. In addition, the absorption of nitrate ions by plants and the volumetric rate of ammonia oxidation were more significant in the systems that applied partial and greater starvation. Statistically greater filter efficiency and ammonia change were observed in the four-day starvation treatment. In contrast, in daily feeding systems, the rate of ammonia production was higher. Finally, partial starvation of fish can bring about better results in the operation of polyculture systems and large profits for breeders.

Key-words: Polyculture aquaponic system, hedging growth, *Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax*, *Salicornia europaea*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

EYXAPISTIEΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Εννοιολογικό πλαίσιο ενυδρείοπονίας-συστήματα ενυδρείοπονίας-ρόλος..	10
1.2 Ενυδρείοπονικά συστήματα πολυκαλλιέργειας	12
1.3 Πηγές προέλευσης της αμμωνίας στα συστήματα ενυδρείοπονίας	13
1.4 Απεκκριτικά προϊόντα και μεταβολίτες αζώτου	16
1.5. Ισοζύγιο μάζας αμμωνίας	18
1.6. Είδη ιχθύων και φυτών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρείοπονία υφάλμυρου νερού.....	23
1.7. Σκοπός του πειράματος	25
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	26
2.1. Περιγραφή συστημάτων ενυδρείοπονίας πειραματικών μεταχειρίσεων	26
2.2. Έναρξη λειτουργίας και ρύθμιση συστημάτων ενυδρείοπονίας-ενεργοποίηση φίλτρου	28
2.3. Εγκλιματισμός ιχθύων και φυτών του πειράματος	29
2.4. Προμήθεια και πρωτόκολλο διαχείρισης ιχθύων τσιπούρας, λαβρακιού και φυτών σαλικόρνιας.....	29
2.5. Σιτηρέσιο και χορήγηση τροφής.....	30
2.6. Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων νερού και αναλύσεις δειγμάτων.....	31
2.6.1. pH.....	33
2.6.2. Ολική αμμωνία (TAN).....	33
2.6.3. Νιτρώδη ιόντα (NO₂-)	34
2.6.4. Νιτρικά ιόντα	35

2.6.5. Φωσφορικά ιόντα	36
2.7. Ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας και φορτίο επιβάρυνσης	36
2.8. Υπολογισμός οξειδωτικής ικανότητας του φίλτρου	38
2.9. Δείκτες λειτουργίας και αποτελεσματικότητας των συστημάτων ενυδρειοπονίας.....	39
2.10. Ισοζύγιο αμμωνίας	41
2.10.1. Εκτίμηση των απαιτούμενων ρυθμών ροής ανακύκλωσης με βάση το ισοζύγιο της αμμωνίας	42
2.11. Στατιστική ανάλυση	43
3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	45
3.2. Απόδοση ενυδρειοπονικών συστημάτων.....	51
4.ΣΥΖΗΤΗΣΗ	59
4.1 Αβιοτικοί παράγοντες.....	59
4.2. Απόδοση ενυδρειοπονικών συστημάτων.....	63
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	66
6.2.Ελληνική Βιβλιογραφία	74

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

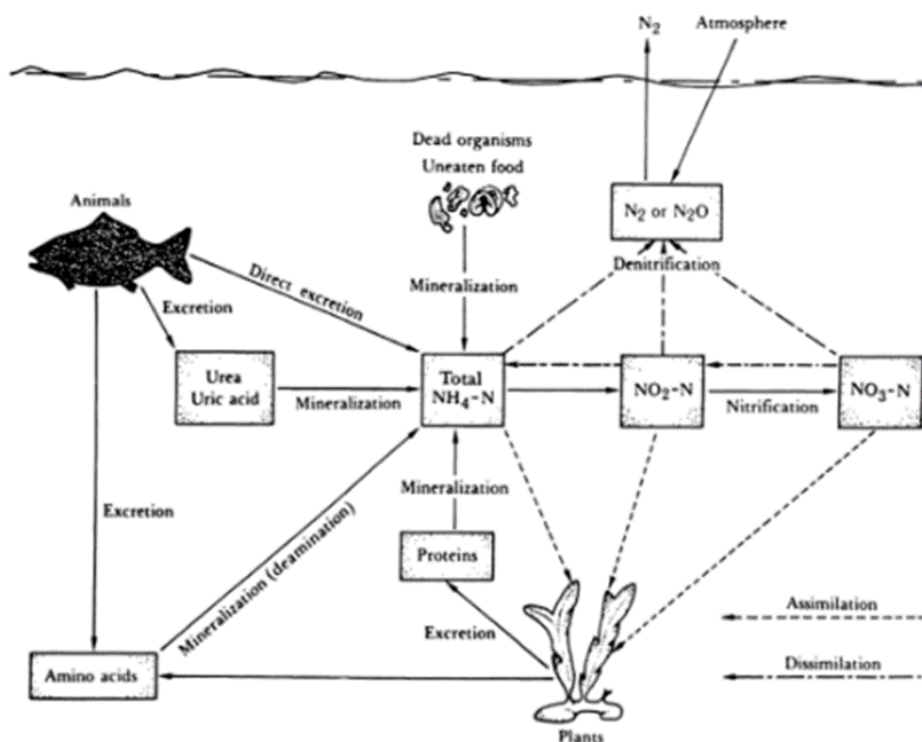
1.1 Εννοιολογικό πλαίσιο ενυδρειοπονίας-συστήματα ενυδρειοπονίας-ρόλος

Η ενυδρειοπονία, βασίζεται σε κλειστά συστήματα ανακύκλωσης νερού τα οποία συνδυάζουν την καλλιέργεια φυτών με την συμβατική υδατοκαλλιέργεια. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται RAS (Recirculating Aquaculture Systems) και λειτουργούν τροφοδοτώντας τους φυτικούς οργανισμούς με τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που προέρχονται από τα μεταβολικά προϊόντα (απόβλητα) των υδρόβιων εκτρεφόμενων οργανισμών τους όπως τα ψάρια, τα καρκινοειδή και τα μαλάκια (Somerville et al. 2014). Αποτελεί στην ουσία, μία εναλλακτική μέθοδο παραγωγής βιοασφαλών τροφίμων, καλύπτοντας τις διατροφικές ανάγκες του πληθυσμού και προκαλώντας ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον, μειώνοντας σημαντικά το περιβαλλοντικό φορτίο (Alkemade et al. 2012, Somerville et al. 2014, Velten et al. 2015). Επιπλέον, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των ενυδρειοπονικών συστημάτων, είναι ότι δεν απαιτείται μεγάλη έκταση για την λειτουργία τους ούτε γόνιμο έδαφος (Nelson 2008). Επομένως, αυτά τα συστήματα πολυκαλλιέργειας είναι εφικτό να λειτουργήσουν ακόμη και σε αστικές περιοχές.

Αυτοσκοπός της ενυδρειοπονίας είναι να καλύψει τις διατροφικές ανάγκες που δημιουργούνται λόγω του ολοένα αυξανόμενου πληθυσμού του πλανήτη. Υπολογίζεται ότι έως το έτος 2050 ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αποτελείται από 9 δις άτομα (Bernstein 2011) και η ζήτηση της τροφής θα αυξηθεί κατά 70 έως 100% σε όλο τον κόσμο (Godfrei et al. 2010). Η εκτροφή ιχθύων και καλλιέργεια φυτών σε συστήματα ενυδρειοπονίας έχει ως στόχο την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω της ελαχιστοποίησης του φορτίου επιβάρυνσης στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, εφαρμόζει μια πληθώρα τεχνικών που έχουν ως στόχο την παραγωγή βιοασφαλών τροφίμων συνδυάζοντας την γεωργία και την αειφορία.

Η ενυδρειοπονία επιδιώκει να επιλύσει προβλήματα της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, εστιάζοντας στην αναζήτηση βιώσιμων μεθόδων φιλικών στο περιβάλλον δίνοντας έμφαση στην αξιοποίηση των μεταβολικών προϊόντων των ιχθύων που είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά και μέταλλα τα οποία απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών (Nelson 2008, Diver 2006). (Εικ.1). Αυτό, επιτυγχάνεται με τον

συνδυασμό της υδροπονίας και της υδατοκαλλιέργειας θέτοντας σε λειτουργία τα συστήματα RAS (Ebeling & Timmons 2012).



Εικόνα 1. Κύκλος του αζώτου σε ενυδρείοπονικά συστήματα με υφάλμυρο νερό (Πηγή: Spotte 1979b).

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 ενυδρείοπονικό σύστημα 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 και μετάλλων από τα φυτά, το απαλλαγμένο πλέον νερό ανακυκλώνεται και επιστρέφει στις δεξαμενές εκτροφής. Η ανακυκλοφορία του νερού, διασφαλίζει την ισορροπία του συστήματος, παρέχοντας διαλυμένο οξυγόνο σε όλα τις 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 (Καπετάνιος 2021).

Σύμφωνα με την έρευνα των Vlahos et al. (2019), το ποσοστό του όγκου του νερού που επανακυκλοφορεί σε ένα ενυδρείοπονικό σύστημα γλυκού ή υφάλμυρου

νερού, είναι της τάξης του 90% και ρέει στα υδροπονικά υποσυστήματα ανάπτυξης των φυτών ενώ το 10% ρέει στο ενυδρείο εκτροφής των ιχθύων δημιουργώντας μια ανανέωση του νερού της τάξης του 10%.

Με τη λειτουργία των συστημάτων ενυδρειοπονίας, προωθείται μια αειφορική μέθοδος παραγωγής οικολογικών τροφίμων χωρίς την χρήση χημικών λιπασμάτων ή την απόρριψη μεγάλου όγκου ύδατος στο φυσικό περιβάλλον. Ο συνδυασμός της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, αποσκοπεί στον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων (μείωση περιβαλλοντικών φορτίσεων της ιχθυοκαλλιέργειας), στον έλεγχο των αποθεμάτων νερού, στη αύξηση της γονιμότητας των εδαφών και στη βιοποικιλότητα, (Alkemade et al. 2012, Somerville et al. 2014, Putra & Yuliando 2015, and Velten et al. 2015).

1.2 Ενυδρειοπονικά συστήματα πολυκαλλιέργειας

Με δεδομένες τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής τον περιορισμό ή την έλλειψη των καλλιεργήσιμων εκτάσεων, η παγκόσμια κοινότητα για την επίλυση του επισιτιστικού προβλήματος κατευθύνθηκε στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων ζωικής και φυτικής προέλευσης, όπως η ολοκληρωμένη πολυτροφική ενυδρειοπονία (Salam et al. 2013). Το Ολοκληρωμένο Πολυτροφικό σύστημα Ενυδρειοπονίας (SIMTAP), επιτυγχάνει την μεγιστοποίηση της συνολικής παραγωγής με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση νερού και ελαχιστοποίηση του όγκου των αποβλήτων. Ένα επιτυχημένο σύστημα πολυκαλλιέργειας, μπορεί να φιλοξενήσει ταυτόχρονα φυτικούς αλλά και υδρόβιους οργανισμούς όπως τα ψάρια και τα καρκινοειδή. Πολύ σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του συστήματος είναι η ορθή επιλογή των ειδών των παραπάνω οργανισμών ως προς την συμπληρωματικότητα, την προσαρμοστικότητα και τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά τους (Rossi et al. 2021).

Για παράδειγμα, κατά την ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή καλλιέργειας φυτών ή φυκών που παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε αυξημένες τιμές αλατότητας. Επιπλέον, οι ζωικοί οργανισμοί που αναπτύσσονται, συμπληρώνουν διατροφικά τους φυτικούς οργανισμούς μέσω των στοιχείων (μακροστοιχεία-μικροστοιχεία) που παρέχουν από τις οργανικές τους απεκκρίσεις. Τα φυτά με τη σειρά τους απορροφούν τις διάφορες μορφές αζώτου όπως η αμμωνία, τα νιτρώδη και τα νιτρικά ιόντα από το νερό, τα οποία αποτελούν τοξικές ουσίες για τα εκτρεφόμενα είδη, όταν βρίσκονται σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1 mg/L.

Σύμφωνα με τους Rossi et al. (2021), τα μεσογειακά είδη όπως η τσιπούρα και το μυτάκι παρουσιάζουν βέλτιστη ανάπτυξη σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας με πολυκαλλιέργεια, χωρίς να έχει μελετηθεί η εκτροφή τους παράλληλα στην ίδια δεξαμενή εκτροφής.

Επιπλέον σημαντικός παράγοντας για την επιλογή των φυτικών οργανισμών, αποτελεί ο ρυθμός απορρόφησης των ανόργανων θρεπτικών συστατικών (άζωτο και φώσφορο) (Chopin et al. 2001). Κατά την παράλληλη εκτροφή πολλών υδρόβιων ειδών στην ίδια δεξαμενή εκτροφής, αυξάνεται η περιπλοκότητα των συνθηκών διαβίωσης. Με το αειφορικό αυτό μοντέλο ενυδρείοπονίας, επιτυγχάνονται μεγάλα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, έχοντας ως γνώμονα τις αρχές της οικολογίας (Allsopp et al. 2008). Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα πολυτροφικού συστήματος αποτελεί εκείνο το οποίο συνδυάζει την ανάπτυξη ψαριών, καρκινοειδών, δίθυρων μαλακίων, φυκιών και αχιρών (Israel et al. 2017).

1.3 Πηγές προέλευσης της αμμωνίας στα συστήματα ενυδρείοπονίας

Τα μεταβολικά προϊόντα (αμμωνία) στους ιχθύες εκλύονται διαμέσου των βραγχίων σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80% (Spotte 1979). Τα υπολείμματα τροφής καθώς και τα απεκκριτικά προϊόντα των ψαριών δύναται να αυξήσουν σημαντικά την συγκέντρωση της αμμωνίας στο νερό με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η διαβίωση και η ευζωία των ψαριών του συστήματος.

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής υδρόβιων ζωικών οργανισμών, στα συστήματα ενυδρείοπονίας με ανακύκλωση νερού (RAS), οι ενώσεις της αμμωνίας απορροφώντας από τις ρίζες των φυτικών οργανισμών. Η απορρόφηση της αμμωνίας από τις ρίζες, αποτελεί έναν οικολογικό τρόπο ανάπτυξης και θρέψης των φυτών (Nelson 2008, Somerville et al. 2014, Putra & Yuliando 2015). Στα εν λόγω συστήματα, κατά την παραγωγική διαδικασία, δεν απορρίπτονται όγκοι νερού και διηθήματα στο περιβάλλον παρά μόνο λιγότερο από 5% (Somerville et al. 2014).

Τα θρεπτικά συστατικά αξιοποιούνται από τα φυτά εφόσον η αμμωνία οξειδωθεί διαμέσου της διαδικασίας της νιτροποίησης (Tyson et al. 2011) σε νιτρώδη ιόντα και νιτρικά ιόντα, τα οποία είναι μη τοξικά παράγωγα (Alessio et al. 2001, Fronte et al. 2016). Στη συνέχεια, τα παράγωγα αυτά, ανάγονται διαμέσου της διεργασίας της απονιτροποίησης και μετατρέπονται σε αέριο άζωτο. Πιο συγκεκριμένα, η αμμωνία και τα νιτρώδη ιόντα που αποτελούν τους τοξικούς μεταβολίτες, μετατρέπονται σε νιτρικά ιόντα, τα οποία δεν αποτελούν κίνδυνο για τα ψάρια και αφομοιώνονται σε ποσοστό 97%

από τα φυτά (Lennard 2006). Με αυτόν τον τρόπο καλύπτεται η θρέψη τους και οι διατροφικές τους απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά. Συνεπώς, το εμπλουτισμένο με θρεπτικά συστατικά (φωσφορικά, νιτρικά ιόντα κ.α) νερό ενός ενυδρείοπονικού συστήματος, αποτελεί φυσικό λίπασμα το οποίο απορροφάται από τις ρίζες των καλλιεργούμενων φυτών (Somerville et al. 2014). Το νερό στη συνέχεια ρέει από την δεξαμενή καλλιέργειας των φυτών (Growbed) απαλλαγμένο σε μεγάλο βαθμό από αμμωνία, προς το ενυδρείο ανάπτυξης των ιχθύων (Fishtank). Η παραπάνω διεργασία, όπως αναφέρει ο Lennard (2006), ορίζεται ως η συνηθέστερη πρακτική τεχνική για την απονιτροποίηση του νερού στις δεξαμενές ενός κλειστού συστήματος εκτροφής ιχθύων RAS.

Οι βιοχημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα με την συμμετοχή αυτότροφων νιτροποιητικών βακτηρίων (*Nitrosomonas sp*-*Nitrobacter sp*) και απονιτροποιητικών βακτηρίων (*Nitrososoccus sp*) που οξειδώνουν τα αμμωνιακά ιόντα σε μορφές που είναι απορροφήσιμες από τα φυτά (Fronte et al. 2016). Τα νιτρώδη και τα νιτρικά ιόντα αποτελούν απορροφήσιμες μορφές αζώτου, με τα νιτρικά ιόντα να δεσμεύονται σε τεράστιες ποσότητες συγκριτικά με τα νιτρώδη ιόντα καθώς είναι λιγότερο τοξικά για τα καλλιεργήσιμα φυτά (Madigan et al. 2014).

Κατά την λειτουργία των ενυδρείοπονικών συστημάτων με ανακύκλωση νερού, ορισμένα στοιχεία τα οποία μεταβάλλουν την ποιότητα του νερού και αποτελούν οργανικά απόβλητα των εκτρεφόμενων ιχθύων, οδηγούνται από το ενυδρείο των ψαριών, στο ενυδρείο καλλιέργειας των φυτικών οργανισμών. Στο ενυδρείο των αναπτυσσόμενων φυτών, πραγματοποιείται η απορρόφηση των νιτρικών και νιτρωδών ιόντων δια μέσω των ριζών τους. Στη συνέχεια, το νερό επιστρέφει απαλλαγμένο σε μεγάλο βαθμό από αμμωνία και νιτρικά ιόντα, στην δεξαμενή των ιχθύων. Κατά την λειτουργία της διαδικασίας της ανακύκλωσης του νερού, πραγματοποιείται εξοικονόμηση του όγκου του νερού που χρησιμοποιείται καθώς αυτό επανακυκλοφορεί. Επιπλέον, η επιτυχία στην απόδοση των συστημάτων εκτροφής RAS είναι σημαντική καθώς εξασφαλίζεται ικανοποιητική θρέψη και ανάπτυξη των εκτρεφόμενων ειδών με μειωμένο κόστος παραγωγής, επιφέροντας μεγάλα κέρδη στους ιχθυοκαλλιεργητές. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι είναι ικανοί να διαταράσσουν την ισορροπία του συστήματος. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι:

- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: pH, θερμοκρασία, αλκαλικότητα διαλυμένο οξυγόνο

- Προάγοντες φόρτισης: υδραυλικό φορτίο, υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού στο φίλτρο
- Βιοτικοί παράγοντες: βακτηριακή αφθονία
- Αβιοτικοί παράγοντες: ρυθμός παραγωγής αζώτου μέσω της τροφής, οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου, στερεά υπολείμματα κοπράνων, και τροφής

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην χημική σύσταση της τροφής η οποία θα καλύπτει τις διατροφικές απαιτήσεις των ιχθύων αλλά και των φυτών στο ενυδρειοπονικό σύστημα σε άζωτο. Παράλληλα, η ποσότητα της χορηγούμενης τροφής στους ιχθύες θα πρέπει να κυμαίνεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων τα οποία διαμορφώνονται ανάλογα με το είδος του φυτού (Somerville et al. 2014). Για παράδειγμα, τα φυλλώδη λαχανικά μπορούν να αναπτυχθούν φυσιολογικά και να απορροφήσουν την κατάλληλη ποσότητα θρεπτικών και αμμωνίας, κατά την χορήγηση 20-50 gr τροφής/m²/ημέρα. Αντίθετα, τα καρποφόρα λαχανικά αναπτύσσονται καλύτερα όταν η ποσότητα της τροφής που προστίθεται στο σύστημα, κυμαίνεται από 50-80 gr/m²/ημέρα. Στα ενυδρειοπονικά συστήματα πραγματοποιείται εκτροφή σαρκοφάγων αλλά και φυτοφάγων ψαριών. Κατά την εκτροφή σαρκοφάγων ψαριών, το σιτηρέσιο θα πρέπει να είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες ζωικής προέλευσης όπως τα ιχθυάλευρα, σε φυτικές ίνες, μέταλλα, ιχνοστοιχεία, λιπίδια και υδατάνθρακες για την σωστή ανάπτυξη τους. Αντίθετα, η σύνθεση τροφής η οποία προορίζεται για κατανάλωση από φυτοφάγους οργανισμούς, θα πρέπει να διαμορφώνεται με βάση στοιχεία φυτικής προέλευσης.

Αυτό επιτυγχάνεται με την χορήγηση συνθετικής τυποποιημένης εμπορικής τροφής (σύμπληκτο) η οποία δίνει την δυνατότητα ελέγχου της περιεκτικότητας των θρεπτικών ουσιών στο σύστημα (Riche & Garling, 2003). Με ελεγχόμενο σιτηρέσιο επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του αριθμού των ιχθύων που μπορούν να αναπτυχθούν σε συγκεκριμένο όγκο νερού (Nelson 2008). Η περίσσεια της τροφής που χορηγείται στα ψάρια επιδρά αρνητικά στη ποιότητα του νερού και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευζωίας των ψαριών και την αύξηση του κόστους εκτροφής (Riche & Garling, 2003). Ο Hughey (2005) αναφέρει ότι, η ποιότητα και η ποσότητα της τροφής επηρεάζουν επίσης την αφθονία των βακτηρίων σ' ένα σύστημα ενυδρειοπονίας.

Ο έλεγχος της ποιότητας του νερού πραγματοποιείται με τον υπολογισμό του ισοζυγίου της μάζας αμμωνίας στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Για τον λόγο αυτό κρίνεται

απαραίτητη η καταγραφή των επιπέδων αζώτου στα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού τόσο στα ενυδρεία καλλιέργειας των φυτών όσο και στην δεξαμενή εκτροφής των ιχθύων. Αξιολογώντας τις τιμές των αποτελεσμάτων μετά την μέτρηση του ποσοστού αμμωνίας, νιτρικών και νιτρικών ιόντων στο νερό, μπορούμε να καταλάβουμε εάν το ενυδρειοπονικό σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Για παράδειγμα, οι υψηλές τιμές αμμωνίας ή νιτρικών ιόντων, αποδίδονται στην ικανοποιητική λειτουργία του βιολογικού φίλτρου. Τα χαμηλά επίπεδα νιτρικών ιόντων ($<80 \text{ mg/L}$), αποδίδονται στην ελάχιστη παροχή τροφής, στο μικρό αριθμό ψαριών ή στο μεγάλο αριθμό φυτών (Τάσιου 2019). Αντίθετα, υψηλά επίπεδα νιτρικών ιόντων ($>150 \text{ mg/L}$), υποδηλώνουν υψηλά επίπεδα παροχής της τροφής στους ιχθύες με αποτέλεσμα τα φυτά να μην δύναται να απορροφήσουν σε ικανοποιητικό βαθμό το άζωτο που είναι σε περίσσεια (Τάσιου 2019).

Η ευζωία των ψαριών διασφαλίζεται μέσω ελέγχου του περιβάλλοντος διαβίωσής τους, τον έλεγχο για ασθένειες, τη θνησιμότητα και την διερεύνηση της πιθανότητας διατροφικού ελλείματος στους εκτρεφόμενους ιχθύες. Παράλληλα, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος για φυσιολογική θρέψη των αναπτυσσόμενων φυτικών οργανισμών που διαβιούν στο σύστημα (Τάσιου 2019).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των συστημάτων εκτροφής με ανακυκλούμενο νερό έναντι των παραδοσιακών μορφών ιχθυοκαλλιέργειας, είναι ο αριθμός των ψαριών και φυτών που χρησιμοποιείται, ο οποίος είναι συνήθως αυξημένος υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται σε πλήρη ισορροπία (Nelson 2008). Επιπλέον, αυτά τα συστήματα παραγωγής είναι ανεξάρτητα από τις ακρέες τιμές της θερμοκρασίας όπως σε περιόδους ξηρασίας και ανυδρίας.

1.4 Απεκκριτικά προϊόντα και μεταβολίτες αζώτου

Τα πολυτροφικά ενυδρειοπονικά συστήματα με ανακυκλούμενο νερό, συχνά εμφανίζουν προβλήματα λειτουργίας, εξαιτίας του χαμηλού ποσοστού διαλυμένου οξυγόνου και των υψηλών συγκεντρώσεων των μεταβολικών προϊόντων των ψαριών στο σύστημα εκτροφής (Sanni and Forsberg 1996). Στα μεταβολικά προϊόντα συμπεριλαμβάνονται η συνολική μάζα της αμμωνίας (TAN), η μη ιονισμένη αμμωνία (NH_3), τα νιτρικά ιόντα (NO_3), τα νιτρώδη ιόντα (NO_2), το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα αιωρούμενα στερεά υλικά (SS) και η μη βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη. Σύμφωνα με τους Hagopian και Riley (1998), τα εκτρεφόμενα ψάρια

αποβάλλουν περίπου 1,0-1,4 mg/L TAN, 13-14 mg/L CO₂ και 10-20 mg/L ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSS) για κάθε 10 mg/L διαλυμένου οξυγόνου (DO) που καταναλώνουν.

Η είσοδος της αμμωνίας σε ένα σύστημα RAS, μπορεί να οφείλεται σε ενδογενείς ή εξωγενείς παράγοντες (Forsberg, 1997). Η ενδογενής παραγωγή αμμωνίας (ENE: endogenous nitrogen excretion), σχετίζεται με την διαδικασία του καταβολισμού των πρωτεϊνών που αποτελούν δομικά στοιχεία των εκτρεφόμενων οργανισμών και εξαρτάται από το πρωτόκολλο διατροφής που χρησιμοποιείται στο εκάστοτε είδος ψαριού. Αντίθετα, η εξωγενής παραγωγή αμμωνίας είναι αποτέλεσμα του καταβολισμού των πρωτεϊνών που προέρχονται από τα υπολείμματα της τροφής η οποία δεν καταναλώθηκε από τα ψάρια. Οι τιμές της παραγόμενης αμμωνίας ENE για τα εκτρεφόμενα είδη σολομού, κυμαίνονται συνήθως από 30-50 $\mu\text{g TAN kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ και 15-35 $\mu\text{g ουρίας kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ και σύμφωνα με τους Fivelstad et al. (1990) και Forsberg (1997), το 80-90% του συνολικού αζώτου που προστίθεται στο σύστημα, αποβάλλεται με τη μορφή αμμωνίας. Αντίθετα, οι τιμές της παραγόμενης αμμωνίας που προέρχονται από τον καταβολισμό των πρωτεϊνών της περίσσειας τροφής σε σολομούς του Ατλαντικού έπειτα από σίτιση έως κορεσμού, κυμαίνονται από 80-180 mg/kg/day και αντιστοιχούν σε ποσοστό 22-33% του συνολικού αζώτου που εισέρχεται στο ενυδρειοπονικό σύστημα (Fivelstad et al. 1990). Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι το ίδιο ποσοστό συμμετοχής στο συνολικό άζωτο του συστήματος, καταλαμβάνει η παραγόμενη αμμωνία από την περίσσεια της τροφής σε συστήματα RAS με περιορισμένη σίτιση των ψαριών.

Τα στερεά οργανικά απόβλητα ενός ενυδρειοπονικού συστήματος RAS μπορεί να είναι αιωρούμενα ή να έχουν καθιζάνει στον πυθμένα των δεξαμενών εκτροφής και περιλαμβάνουν συνήθως υπολείμματα μη καταναλωθείσας τροφής, περιττώματα των ψαριών, μάζα μικροβιακού πληθυσμού και μικροφύκη τα οποία είναι πιθανό να αναπτυχθούν (Chen et al. 1993). Η συσσώρευση υψηλών συγκεντρώσεων των στερεών αποβλήτων στα συστήματα εκτροφής και η αποσύνθεσή τους, μπορούν να επιφέρουν δραματικές επιπτώσεις στην υγεία των ψαριών λόγω της αμμωνίας που παράγεται (Chen et al. 1993). Επιπλέον, τα στερεά απόβλητα όταν συσσωρεύονται σε μεγάλο βαθμό, επηρεάζουν την ποιότητα του νερού και δημιουργούν κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη παθογόνων βακτηρίων (Chen et al. 1993). Πολλά από αυτά τα βακτήρια είναι υπεύθυνα για την πρόκληση ποικίλων συμπτωμάτων στους εκτρεφόμενους οργανισμούς

όπως η σήψη των πτερυγίων και η άμεση βλάβη των βραγχίων (Noble & Summerfelt 1996). Εκτός από τις ασθένειες που είναι πιθανό να προκληθούν, συχνά μπορεί να επηρεαστεί και η αναπαραγωγική συμπεριφορά των ψαριών, η ανάπτυξη των γονάδων, το στάδιο της ωογένεσης, το προ-νυμφικό στάδιο και το στάδιο του νεαρού ιχθυδίου (Pillay & Kutty 2005).

1.5. Ισοζύγιο μάζας αμμωνίας

Η αμμωνία είναι μια από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους ελέγχου της ποιότητας του νερού σχεδόν σε όλα τα συστήματα ανακύκλωσης νερού υδατοκαλλιέργειας (RAS). Η αμμωνία παράγεται ως υποπροϊόν μεταβολισμού των πρωτεϊνών της τροφής, και είναι συνάρτηση του ρυθμού παροχής της τροφής. Σε ένα σύστημα (χωρίς σημαντική βιομάζα φυτών), η αμμωνία οξειδώνεται από τα νιτροποιητικά βακτήρια που βρίσκονται σε αφθονία στο φίλτρο. Ο ρυθμός νιτροποίησης εξαρτάται από την συγκέντρωση της αμμωνίας που εισρέει στο φίλτρο (Losordo, 1991)

Το βασικό ερώτημα που προκύπτει σε ότι αφορά τον σχεδιασμό του συστήματος εστιάζει στον προσδιορισμό της απαιτούμενης παροχής νερού στο φίλτρο ώστε να διασφαλιστεί η μεταβολή της αμμωνίας και να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων για τα είδη ψαριών που θα καλλιεργηθούν.

Η απάντηση του ερωτήματος στοιχειοθετεί την μαθηματική έκφραση ενός πρότυπου μοντέλου που περιγράφει τη μεταβολή της αμμωνίας. Η εκτίμηση του ισοζυγίου συγκέντρωσης της αμμωνίας ως μια μεταβλητή ελέγχου της ποιότητας του νερού, προσδιορίζεται μέσω των συνθήκων που απαιτούνται ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος (Losordo, 1991)

Η προσαρμογή του συστήματος με σταθερή παροχή της τροφής και σταθερού ρυθμού ανανέωσης του νερού, είναι απαραίτητη για τη σταθεροποίηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας στο σύστημα αυτό. Όταν το σύστημα βρίσκεται στη μέγιστη ικανότητα φόρτισης, η συγκέντρωση της αμμωνίας αυξάνει σημαντικά, και διαμέσου των βιοχημικών μηχανισμών σταθεροποιείται στην ελάχιστη τιμή της, ενώ θα πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων ασφάλειας για τα εκτρεφόμενα είδη ψαριών (Losordo, 1991)

Σ' ένα σύστημα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία νερού η ανάλυση του ισοζυγίου της μάζας της αμμωνίας, ακολουθεί το νόμο διατήρησης της μάζας. Ο Losordo

(1991) αναφέρει ότι, ο υπολογισμός του ισοζυγίου της μάζας της αμμωνίας σ' ένα κλειστό σύστημα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία νερού εξαρτάται από την παροχή του νερού ενώ για τον προσδιορισμό της θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

1. καθορισμός των ορίων ανοχής του συστήματος
2. υπολογισμός της ροής του νερού (παροχή) στα σημεία εισόδου (inlet) και εξόδου (outlet) από το σύστημα (δεξαμενές εκτροφής) προς το φίλτρο.
3. ανάλυση ισορροπίας στο σύστημα
4. προσδιορισμός του συντελεστή μετατροπής της αμμωνίας στο σύστημα

Η σχέση που περιγράφει το ισοζύγιο της μάζας της αμμωνίας περιγράφεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

Ρυθμός συσσώρευσης της μάζας νερού στο σύστημα = Ο ρυθμός ροής μάζας νερού στο σύστημα - ο ρυθμός ροής μάζας νερού εκτός συστήματος + ο καθαρός ρυθμός μετατροπής της μάζας εντός του συστήματος

Ο μετασχηματισμός αναφέρεται στην οξείδωση της συγκέντρωσης των μεταβολιτών δηλαδή της αμμωνίας στο σύστημα και μπορεί να προκύψει από τις διαδικασίες που δημιουργούν τη συγκεκριμένη μορφή και είναι μείζονος σημασίας για την ισορροπία του συστήματος. Η προηγούμενη μαθηματική σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\text{Συσσώρευση} = (\text{Είσοδος} - \text{Έξοδος}) + (\text{Παραγωγή} - \text{Κατανάλωση}) \quad (1)$$

Στην περίπτωση που η παραπάνω μαθηματική σχέση εφαρμοστεί σε ένα κλειστό σύστημα υδατοκαλλιέργειας, οι πηγές αζώτου στο σύστημα σηματοδοτούν και τα όρια του συστήματος. Το σύστημα αποτελείται από τη δεξαμενή καλλιέργειας των ψαριών και το βιολογικό φίλτρο (επεξεργάζεται το επιβαρυνμένο νερό με ρυπαντές). Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος (το υδραυλικό φορτίο, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, ο ρυθμός ανακύκλωσης του νερού) είναι απαραίτητα και λαμβάνονται υπόψη κατά την πραγματοποίηση μιας πλήρους ανακυκλοφορίας του νερού (Εικ.2).

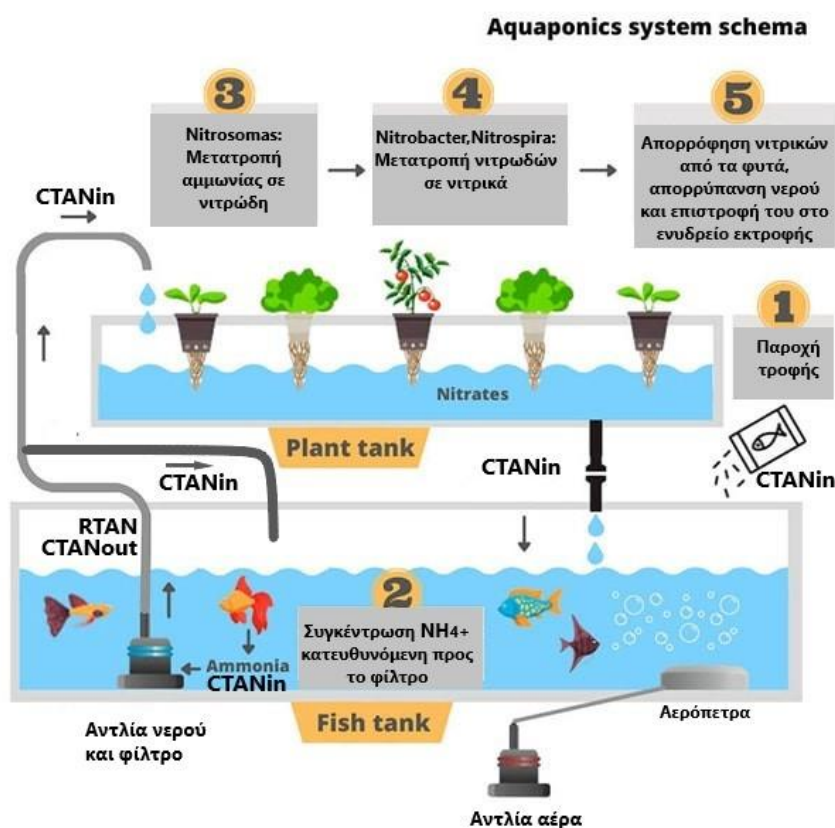
Το νερό κυκλοφορεί στο σύστημα με σταθερή ταχύτητα διασφαλίζοντας μια σταθερή ροή, ομοιόμορφη κατανομή των θρεπτικών συστατικών στο ενυδρειοπονικό σύστημα και διατηρεί σε σταθερά επίπεδα κάθε ποιοτική μεταβολή της σύστασης του

νερού που εισέρχεται στο σύστημα διαμέσου της ανανέωσης του νερού και θα συνυπολογίζεται στη μαθηματική σχέση ως εισροή (σημείο εισόδου).

Οι απώλειες που πιθανόν να παρατηρούνται στο σύστημα (απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων) συγκαταλέγονται στην εκροή του νερού από το σύστημα (σημείο εξόδου). Η παραγωγή και η κατανάλωση είναι το αποτέλεσμα της βιοχημικής διεργασίας που λαμβάνει χώρα στο σύστημα και αποτυπώνεται διαμέσου της ανακύκλωσης του νερού με σταθερή ροή. Κάθε νέο ποιοτικό χαρακτηριστικό που εισέρχεται στο σύστημα διαμέσου του νερού ανακυκλοφορίας, συνυπολογίζεται στην εισροή του συστήματος. Όταν η μεταβολή στο σύστημα σταθεροποιηθεί τότε δεν παρατηρείται αλλαγή στα ποσοτικά χαρακτηριστικά του νερού.

Στην προηγούμενη μαθηματική σχέση (1), ο παράγοντας της συσσώρευσης λαμβάνει την τιμή μηδέν. Υπό αυτές τις συνθήκες, το άθροισμα του νερού που εισρέει στην μονάδα εκτροφής συν την παραγωγή ισούται με το άθροισμα του νερού που εκρέει συν την κατανάλωση.

$$\text{Εισροή} + \text{Παραγωγή} = \text{Εκροή} + \text{Κατανάλωση} \quad (2)$$



Εικόνα 2. Αποτύπωση της ροής του ισοζυγίου της μάζας αμμωνίας σε ενυδρειοπονικό σύστημα.

Οι Yogev et al. (2016), αναφέρουν ότι το κύριο πλεονέκτημα ενός ενυδρειοπονικού συστήματος σχετίζεται με την υψηλή αποδοτικότητα της χρήσης του νερού, καθώς ο όγκος του νερού που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των ψαριών και των φυτών είναι μικρότερος συγκριτικά με τον όγκο του νερού που χρησιμοποιείται στη συμβατική γεωργία. Τα συστήματα εκτροφής και καλλιέργειας με ανακυκλούμενο νερό, αποτελούν κίνητρο για τους γεωργούς καθώς δεν απαιτείται η χρήση γόνιμου εδάφους και μεγάλων γεωργικών εκτάσεων για την επιτυχή παραγωγή λαχανικών ανά μονάδα επιφάνειας. Παράλληλα, δεν χρησιμοποιούνται χημικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα που είναι τοξικά για τα ψάρια. και ως εκ τούτου επιλέγονται άλλες βιολογικές πρακτικές όπως η παροχή σύμπληκτων εμπλουτισμένα με θρεπτικά στοιχεία.

Στα συμβατικά συστήματα καλλιέργειας φυτών καθώς και στα συστήματα ενυδρειοπονίας το ισοζύγιο της μάζας αμμωνίας (N) εκφράζεται ένα σημείο κλειδί επειδή οι απαιτήσεις σε άζωτο(N) από τα φυτά δύναται να αντισταθμίσουν τη χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης του αζώτου (NUE) από τα ψάρια

Οι ζωοτροφές που χρησιμοποιούνται σήμερα στην ιχθυοκαλλιέργεια, αποτελούν περισσότερο από το 50% του συνολικού κόστους παραγωγής, εξαιτίας της υψηλής τιμής της πρωτεΐνης (κύρια πηγή αζώτου) που περιέχεται σε αυτές (Crab et al. 2007). Επιπλέον, σε συστήματα υδατοκαλλιέργειας, μόνο το 11% έως 36% της εισροής N μέσω των ζωοτροφών καταλήγει στο τελικό εμπορεύσιμο προϊόν ενώ περίπου το 75% απεκκρίνεται στο νερό από τα ψάρια (Hargreaves 1998, Gross et al., 2000). Η ποσότητα του αζώτου που απεκκρίνεται από τους ιχθύες, επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του νερού και αυξάνει την NH_3 , την εξατμισοδιαπνοή και την εκπομπή N_2O στην ατμόσφαιρα (Muralidha et al. 2017). Επομένως, η τεχνολογία των συστημάτων ενυδρειοπονίας αποτελεί μια πολύτιμη λύση γιατί συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την εκτροφή ψαριών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις εκπομπές N_2O και τη χρήση νερού με την αύξηση της απόδοσης χρήσης του αζώτου (NUE) μέσω της παραγωγής φυτών (Paudel,2020).

Ελάχιστες μελέτες είναι διαθέσιμες σχετικά με το ισοζύγιο της μάζας αμμωνίας στα συστήματα ενυδρειοπονίας με ανακύκλωση νερού οι οποίες αξιολογούν τη συμβολή των φυτών στην ανάκτηση N από τα απόβλητα των ψαριών. Οι Endut et al. (2014) αναφέρουν ότι από το συνολικό ποσό της αμμωνίας που εκλύεται από τα εκτρεφόμενα ψάρια στο νερό των υδροπονικών υποσυστημάτων ανακτάται το 88% από τα φυτά. Μία ακόμη έρευνα κατέδειξε ότι το ποσοστό της εισροής του αζώτου το οποίο ανακτήθηκε από την βιομάζα των ψαριών ήταν 24,9% και ένα επιπλέον 22,3% ανακτήθηκε από την

βιομάζα των φυτικών οργανισμών (Fang et al. 2017). Αντίθετα, οι Jaeger et al. (2019) αναφέρουν ότι, το 19,3% του αζώτου προερχόμενο από τις ιχθυοτροφές, ανακτήθηκε από τη βιομάζα σε κοινό κυπρίνο και μαρούλι.

Επιπλέον, φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η εποχή στην οποία γίνονται οι μετρήσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα της αξιοποίησης του αζώτου από τους οργανισμούς. Στην μελέτη που διεξήχθη σε ενυδρειοπονικό σύστημα εκτροφής κοινού κυπρίνου και καλλιέργειας λάχανου pak choi (*Brassica chinensis*), η συνολική αποτελεσματικότητα χρήσης του αζώτου υπολογίστηκε και ήταν ίση με 48,9% έχοντας μία μικρή διακύμανση μεταξύ καλοκαιριού (43,8%) και φθινοπώρου (44,6%) (Zou et al. 2016a, 2016b). Εκτός από την εποχή, σημαντική παράμετρος για τον ρυθμό αφομοίωσης του αζώτου αποτελεί το είδος του οργανισμού. Στην ερευνητική εργασία των Hu et al. (2015), μελετήθηκε η ποσότητα απορρόφησης του αζώτου από φυτά τα οποία καλλιεργούνται σε συστήματα ενυδρειοπονίας RAS. Συγκεκριμένα, υπολόγισαν την τιμή NUE για την ντομάτα (*Solanum lycopersicum*) και για το κινέζικο λάχανο pak choi, αντίστοιχα. Η ποσοστιαία τιμή της αποτελεσματικότητας αξιοποίησης του αζώτου για την ντομάτα ήταν 41,3% η οποία διέφερε από την τιμή NUE του pak choi η οποία ήταν 34,4%.

Ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το NUE, είναι η ποσότητα της χορηγούμενης τροφής στους ιχθύες του ενυδρειοπονικού συστήματος. Οι Wongkiew et al. (2017a) αναφέρουν ότι η βελτίωση του NUE επιτυγχάνεται με μείωση της ποσότητας χορήγησης της τροφής στα ψάρια. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου η ποσότητα του σιτηρεσίου, μειώθηκε από 50 σε 35 g d⁻¹, η απέκκριση αζώτου στο νερό από τους εκτρεφόμενους οργανισμούς μειώθηκε κατά το ήμισυ. Επιπλέον, στην περίπτωση όπου η αναλογία της χορηγούμενης ποσότητας τροφής προς τα φυτά μειώθηκε κατά 30%, η απορρόφηση του αζώτου αυξήθηκε κατά 50%.

Τέλος, ο Paudel (2020) αναφέρει πως η αναλογία της βιομάζας φυτών προς ψαριών, επηρεάζει το μέγεθος της αφομοίωσης του αζώτου από τους αναπτυσσόμενους οργανισμούς. Υποστήριξε ότι αυξάνοντας την αναλογία φυτών προς ψαριών από 0,06 σε 0,95, το NUE αυξήθηκε από 29,3 σε 39,1%.

Οι Carmelo et al. (2020), πραγματοποίησαν μελέτη η οποία συγκρίνει την επίδραση διαφορετικών πυκνοτήτων εκτρεφόμενων ψαριών, διατηρώντας σταθερή την επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου και της πυκνότητας των φυτών, στην ισορροπία του αζώτου σε συστήματα υδροπονίας ανακυκλούμενου νερού. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα αυτή ήταν ότι με χαμηλότερη πυκνότητα ψαριών εκτροφής,

επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αφομοίωση του αζώτου στην βιομάζα των ιχθύων αλλά και καλύτερη απορρόφηση του αζώτου από τα φυτά του Grow bed. Επιπλέον, η παραγωγή αμμωνίας σε αέρια μορφή είναι αισθητά μικρότερη συγκριτικά με ένα ενυδρειοπονικό σύστημα RAS υψηλότερης ιχθυοφόρτισης.

1.6. Είδη ιχθύων και φυτών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία υφάλμυρου νερού

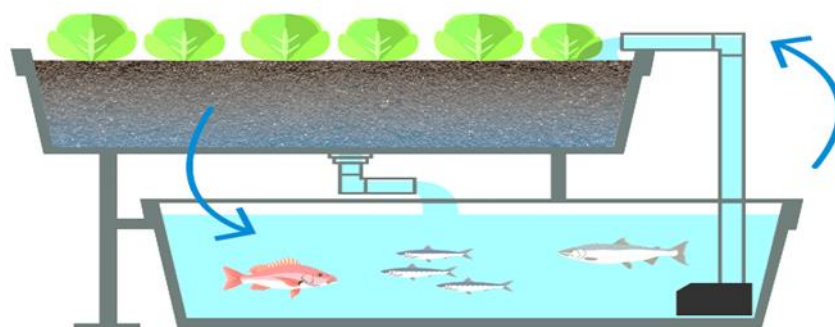
Η επιλογή των ειδών ιχθύων που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία, σχετίζεται με τις διατροφικές τους απαιτήσεις, τη θερμοκρασία, το pH, τα διαλυμένα στερεά και τις συνθήκες εκτροφής (Diver 2006, Nelson 2008). Στα είδη ιχθύων γλυκού νερού που απαιτούν ύψηλές ή ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες ανάπτυξης, συγκαταλέγονται η τιλάπια, η πέστροφα, η πέρκα (Diver 2006), το λαβράκι, το γατόψαρο, ο κυπρίνος, το κόι, το χρυσόψαρο και το είδος *Scortum barcoo* (Nelson 2008). Επιπλέον, στα συστήματα RAS, μπορούν να αναπτυχθούν με επιτυχία και διάφορα είδη διακοσμητικών ψαριών (Rakocy et al. 2006).

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν είδη όπως το λαβράκι (*Morone saxatilis*), τα οποία αδυνατούν να αναπτυχθούν με επιτυχία στα συστήματα ενυδρειοπονίας με ανακύκλωση νερού καθώς δεν μπορούν να ανεχθούν υψηλά επίπεδα καλίου, ένα κοινό συμπλήρωμα το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των φυτών (Rakocy et al. 2006). Στον πίνακα 1. παρουσιάζονται τα όρια αντοχής στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, αμμωνίας, νιτρικών, θερμοκρασίας και pH διαφορετικών ειδών ιχθύων.

Πίνακας 2. Όρια ανοχής διάφορων ειδών ψαριών στο διαλυμένο οξυγόνο, την αμμωνία τη θερμοκρασία, pH και τα νιτρώδη ιόντα.

Είδη ιχθύων	DO (mg/L)	Θερμοκρασία (F°)	pH	Αμμωνία (mg/L)	Νιτρώδη (mg/L)
Sunfish	>5	68-80	7-8.5	<0.01	<0.8
Channel catfish	>4	70-90	7-8	<0.05	<0.8
Goldfish/Koi	>5	65-75	6-8	<0.08	<0.6
Rainbow trout	>6	50-64	6.5-8	<0.01	<0.8
Tilapia	>5	70-90	7	<0.04	<0.8
Yellow perch	>5	70-76	7	<0.02	<1.0

Σύμφωνα με τον Nelson (2008), στα ενυδρειοπονικά συστήματα, μπορεί να αναπτυχθεί με επιτυχία ένας μεγάλος αριθμός φυτών (περισσότερα από 60 φυτά). Πιο αποτελεσματικά σε τέτοιου τύπου καλλιέργειες εμφανίζονται τα φυλλώδη πράσινα λαχανικά, ορισμένα βότανα και καρποφόρα είδη (Εικ. 3)



Εικόνα 3. Απεικόνιση ενυδρειοπονικού συστήματος με μαρούλι (Πηγή: Connolly & Trebic 2010)

Στα μεγάλης κλίμακας συστήματα ενυδρειοπονίας (εμπορικά) κριτήριο επιλογής του φυτού το οποίο πρόκειται να καλλιεργηθεί είναι το οικονομικό όφελος. Μεταξύ των καλλιεργήσιμων φυτών υψηλής εμπορικής αξίας συγκαταλέγονται τα βότανα (ο βασιλικός, το σχοινόπρασο, ο κόλιανδρος και ο μαϊντανός), με τον χρόνο συγκομιδής τους να κυμαίνεται από 25 έως 40 ημέρες. Επιπροσθέτως, το μαρούλι παρουσιάζει μικρότερο χρόνο συγκομιδής (3-4 εβδομάδες), με το μεγαλύτερο μέρος του να χρησιμοποιείται ως εδώδιμο, με αποτέλεσμα να το εντάσσουν σε προϊόν υψηλής ζήτησης.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των φυτών, από το οποίο κρίνεται σε μεγάλο βαθμό η επιτυχία της καλλιέργειας, αποτελεί η ανθεκτικότητα στα παράσιτα. Τα φυλλώδη πράσινα λαχανικά (Εικ.4) όπως το παντζάρι, το κινέζικο λάχανο (pak choi), οι λαχανίδες και το κάρδαμο παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα στα παράσιτα σε αντίθεση με τα καρποφόρα τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία (Rakocy 1989).



Εικόνα 4. Φυλλώδη λαχανικά και το εκτεταμένο ριζικό σύστημα σε ενυδρειοπονικό (Πηγή: Somma 2008, Wilson 2010).

1.7. Σκοπός του πειράματος

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας είναι να μελετήσει και να αναλύσει το ισοζύγιο της μάζας της αμμωνίας σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας με πολυκαλλιέργεια που παράγεται από δύο είδη ψαριών την τσιπούρα και το λαβράκι όταν συγκαλλιεργούνται με σαλινόρνια σε αλατότητα 12 ppt.

Πιο αναλυτικά, μέσω της παρούσης εργασίας θα επιχειρηθεί να αναλυθεί, να υπολογισθεί και να συσχετιστεί ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας, ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας και να αξιολογηθεί η συνεισφορά των ψαριών στην ανάκτηση του N από τα φυτά όταν οι τσιπούρες και τα λαβράκια υπόκεινται σε πρόγραμμα επαναλαμβανόμενης στέρησης της τροφής και επανασίτισης (ημερήσια παροχή τροφής, 4 και 7 ημέρες ασιτία ακολουθούμενη από επανασίτιση).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιγραφή συστημάτων ενυδρειοπονίας πειραματικών μεταχειρίσεων

Το πειραματικό μέρος της ερευνητικής μας εργασίας διεξήχθη στο εργαστήριο ενυδρειοπονίας του Τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 9 αυτόνομα συστήματα ενυδρειοπονίας ανακυκλοφορίας νερού με την μέθοδο συνεχόμενης ροής μέσω πλωτής σχεδίας (Floating raft). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στις ελεύθερες ρίζες των καλλιεργούμενων φυτών να δεσμεύουν όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξή τους (Somerville et al. 2014), συμβάλλοντας στην κυκλοφορία του νερού προς το ενυδρείο εκτροφής των ιχθύων. Στη συνέχεια, τα αυτόνομα συστήματα διαχωρίστηκαν ανά τρία σε τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις (Εικ.5). Κάθε πειραματική διάταξη αποτελούνταν από ένα ενυδρείο εκτροφής ψαριών διαστάσεων 30x30x60 cm και συνολικού όγκου 54 L, μια υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας των φυτών (Grow bed) διαστάσεων 30x30x60, συνολικού όγκου 54 L και με καλλιεργητική επιφάνεια 180 cm² και ένα φίλτρο τύπου sump ανοδικής και καθοδικής ροής.

Κάθε αυτόνομο σύστημα ενυδρειοπονίας υποστηρίχθηκε από ένα φίλτρο τύπου sump το οποίο διαχωρίστηκε σε τρία τμήματα, το μηχανικό, το βιολογικό και το τμήμα της αντλίας όπου διοχέτευε νερό στη δεξαμενή καλλιέργειας των φυτών και συνέβαλε στην ανακύκλωση του νερού στο σύστημα. Το μηχανικό φίλτρο είχε διαστάσεις 27 x 17 x 17,5 cm με όγκο 8,03 L το οποίο κάλυπτε συνολική επιφάνεια 297,5 cm². Επίσης, στο μηχανικό φίλτρο τοποθετήθηκε ειδικό διάτρητο καλάθι σχήματος παραλληλόγραμμου, στο οποίο προστέθηκαν τρεις στρώσεις υαλοβάμβακα με πάχος 15 cm προκειμένου να γίνεται αποτελεσματικότερη κατακράτηση των περιττωμάτων, αιωρούμενων σωματιδίων και των υπολειμμάτων τροφής. Το βιολογικό φίλτρο είχε διαστάσεις 27x34x35 cm, συνολικού όγκου 23,8 L στο οποίο πραγματοποιούνταν η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα μέσω των νιτροποιητικών βακτηρίων *Nitrosomonas sp* και *Nitrobacter sp* (Εικ. 6). Μετά την βιοχημική επεξεργασία, το νερό έρεε προς το τελευταίο τμήμα του φίλτρου., το οποίο αποτελούνταν από μία αντλία βυθού (Aqua Medic OR 3500 L / h, 38 W, 2,6 m/h max) διαμέσου της οποίας το νερό κυκλοφορούσε προς την ενυδρειοπονική δεξαμενή των φυτών και στο ενυδρείο

εκτροφής των ιχθύων δημιουργώντας παροχή νερού ίση με $1500 \text{ cm}^3/\text{min}$ (Hussain et al. 2015). Η παροχή ρυθμίστηκε και ήταν παρόμοια σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις.



Εικόνα 5. Διάταξη αυτόνομων συστημάτων ενυδρειοπονίας που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Διακρίνονται στην πρώτη σειρά τα grow bed, στη δεύτερη σειρά τα ενυδρεία εκτροφής των ψαριών και στο κάτω μέρος το φίλτρο τύπου sump (Πηγή: Μητσόπουλος και Μπαμπουκλής 2019).



Εικόνα 6. Φίλτρο τύπου sump που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα ενυδρειοπονίας. (Πηγή: Μητσόπουλος και Μπαμπουκλής 2019)

Τα καλλιεργούμενα φυτά, , μπορούν να αναπτυχθούν στερεωμένα μέσα σε διάτρητα δοχεία με άργιλο τύπου LECA ή κοκκώδους ηφαιστειογενούς λάβα (μέθοδος επιπλέουσας σχεδίας-raft). Στα δοχεία αυτά, πραγματοποιείται μία επιπλέον επεξεργασία του νερού καθώς αναπτύσσονται βακτηριακές αποικίες, τα οποία συμβάλλουν στη βιοχημική επεξεργασία του νερού (Rakocy et al. 2006)). Προηγούμενες μελέτες (Rakocy et al. 2006) αναφέρουν ότι στο συγκεκριμένο τύπο καλλιέργειας (μέθοδος rafft) αντενδείκνυται η προσθήκη φίλτρων. Η παραδοχή αυτή αντικρούεται από πρόσφατες μελέτες (Somerville et al. 2014, Vlahos et al. 2019) οι οποίες υποδεικνύουν τη χρήση φίλτρων στα συστήματα ενυδρειοπονίας για βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

2.2. Έναρξη λειτουργίας και ρύθμιση συστημάτων ενυδρειοπονίας-ενεργοποίηση φίλτρου

Κατά την έναρξη της λειτουργίας του πειράματος, το νερό αλατότητας 12 ppt, κυκλοφορούσε από τα ενυδρεία εκτροφής και έρεε καθοδικά προς το μηχανικό φίλτρο, στη συνέχεια προς το βιολογικό φίλτρο και από εκεί απαλλαγμένο πλέον από αμμωνία και νιτρώδη ιόντα, στο χώρο της αντλίας (SUNSUN, HJ-1841 multifunction submersible pump, 40W). Η αντλία προωθούσε το πλούσιο σε νιτρικά ιόντα νερό κατά 90% στην δεξαμενή των καλλιεργούμενων φυτικών οργανισμών και κατά 10% στα ενυδρεία ανάπτυξης των ιχθύων. Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι, τα συστήματα τέθηκαν σε λειτουργία για 24 ώρες μόνο με το νερό, ώστε να γίνει πλήρης απομάκρυνση κάθε ίχνους χλωρίου που πιθανότατα υπήρχε.

Έπειτα, τα συστήματα ρυθμίστηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφουν οι Vlahos et al. (2019) προσθέτοντας 10 κόκκους υποστρώματος (χαλίκι, λάβα κλπ) από ήδη ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο και 0,2 g NH₄Cl ώστε να παραχθεί αμμωνία (2 mg/L) σε αυξημένη συγκέντρωση. Επιπλέον, προστίθονταν μία αμπούλα βακτηρίων Prodigio BioDigest κάθε εβδομάδα για διάστημα 20 ημερών, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του πληθυσμού των νιτροποιητικών βακτηρίων στην περιοχή του φίλτρου.

2.3. Εγκλιματισμός ιχθύων και φυτών του πειράματος

Τα δύο είδη (*Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax*) διαμοιράστηκαν ανά 20, έπειτα από 30 ημέρες σταδιακής προσαρμογής σε αλατότητα 12 ppt, σε τρεις πειραματικές ομάδες σε εννέα αυτόνομα ενυδρειοπονικά συστήματα συνολικού όγκο 140 L. Η προσαρμογή των ψαριών στις αλατότητες έγινε σταδιακά, όπου η αλατότητα μειώνονταν κατά 3-5 ppt μια φορά την εβδομάδα για διάρκεια 30 ημέρες σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε από τους Thomas et al. (2021) και Vlahos et al. (2019).. Ο συνολικός αριθμός ιχθύων κάθε ενυδρειοπονικού συστήματος προσαρμόστηκε σύμφωνα με τις πειραματικές μελέτες των Arends et al. (1999) και Montero et al. (1999) που διερεύνησαν τα επίπεδα stress ανάλογα με τις ιχθυοπυκνότητες.

Η *Salicornia europaea* όπως αναφέρθηκε, μεταφέρθηκε στο εργαστήριο και, ποτίζονταν αρχικά με νερό του ποταμού, αλατότητας 4 ppt για διάστημα 10 ημερών. Στη συνέχεια ξεκίνησε η σταδιακή προσαρμογή καταρτίζοντας πρόγραμμα αύξησης της αλατότητας κατά 3 ppt κάθε 5 ημέρες ώστε να φτάσει στην επιθυμητή πειραματική αλατότητα (12 ppt) και διήρκησε συνολικά 30 ημέρες σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε από τους Vlahos et al. (2019), Thomas et al. (2021) και Vlahos et al. (2023). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας προσαρμογής τα φυτά διαμοιράστηκαν ανά 5 στις πειραματικές μεταχειρίσεις. Η ημέρα έναρξης του πειράματος καθορίστηκε ως η ημέρα προσθήκης των φυτών στα συστήματα.

2.4. Προμήθεια και πρωτόκολλο διαχείρισης ιχθύων τσιπούρας, λαβρακιού και φυτών σαλικόρνιας

Η εκτροφή των ιχθύων με τη μέθοδο της πολυκαλλιέργειας παράλληλα με την καλλιέργεια των φυτών επιλέχθηκε για την έρευνά μας και αποσκοπούσε στην διαχείριση παραγωγής της αμμωνίας η οποία αποτελεί την κύρια πηγή αζώτου στο σύστημα. Η καταγραφή του ποσοστού αμμωνίας που εισέρχεται και του ποσοστού που εξέρχεται από τα ενυδρεία εκτροφής διαδραμάτιζε πρωταρχικό ρόλο στην πειραματική διαδικασία καθώς με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα της συνολικής αμμωνίας που παράγονταν ημερήσια στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Η επιθυμητή συνολική συγκέντρωση αμμωνίας για την μελέτη μας, είναι η συγκέντρωση η οποία επιφέρει την μέγιστη παραγωγή των φυτικών οργανισμών και την μέγιστη αύξηση των ιχθύων χωρίς να προκαλεί αρνητικές συνέπειες στην ευζωία τους.

Η διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ήταν 75 ημέρες από τις 18 Ιουνίου 2022 έως 31 Αυγούστου 2022. Για την υλοποίηση του πειράματος, μεταφέρθηκαν 180 ιχθύδια από ιχθυογεννητικό σταθμό της εταιρείας AVRAMAR η οποία εδρεύει στην Χαλκίδα, σε ειδικά δοχεία μεταφοράς, στο εργαστήριο ενυδρείοπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Κάθε σύστημα μεταχείρισης περιείχε 10 άτομα τσιπούρας (*Sparus aurata*) αρχικού μέσου βάρους $6,33 \pm 0,07$ και 10 άτομα λαβρακιού (*Dicentrarchus labrax*) αρχικού μέσου βάρους $6,35 \pm 0,07$ μέσα στο ίδιο ενυδρείο εκτροφής με αλατότητα 12 ppt. Οι τσιπούρες, διαχωρίζονταν από τα λαβράκια μέσω ενός διχτυωτού κλωβού διαστάσεων 30x30x30cm, ο οποίος ήταν τοποθετημένος στο εσωτερικό της δεξαμενής εκτροφής των ψαριών για αποφυγή επιθετικής συμπεριφοράς μεταξύ των δυο ειδών.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 45 φυτά σαλικόρνιας (*Salicornia europaea*) τα οποία προήλθαν από το Δέλτα του ποταμού Έβρου και τοποθετήθηκαν ανά 5 σε κάθε σύστημα μεταχείρισης. Οι φυτικοί οργανισμοί του πειράματος ήταν τοποθετημένοι στην ειδικά διαμορφωμένη επιπλέοντα σχέδια από φελιζόλ (growbed) στην οποία διανοίχτηκαν οπές διαμέτρου 8 cm. Η σαλικόρνια επιλέχθηκε στο παρόν πείραμα διότι ως αλόφυτο μπορεί να αναπτυχθεί σε συνθήκες αλατότητας μεγαλύτερες από 200 mM (400-600 mM NaCl) (Behzad et al. 2019).

Ο έλεγχος της ποιότητας του ανακυκλούμενου νερού των συστημάτων ενυδρείοπονίας, διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της λειτουργίας τους.

2.5. Σιτηρέσιο και χορήγηση τροφής

Το σιτηρέσιο που χορηγήθηκε στα ψάρια, κατά τη διάρκεια της πειραματικής μας μελέτης, αποτελούνταν από σύμπηκτα τα οποία παρασκευάστηκαν για τις ανάγκες του ερευνητικού έργου FutureEUAqua. Η τροφή που χρησιμοποιήθηκε, διέθετε την κατάλληλη συνεκτικότητα, συμβάλλοντας στην εύκολη συλλογή υπολειμμάτων τα οποία συσσωρεύονται και προσκολλώνται στα τοιχώματα των ενυδρείων μετά την σίτιση των ιχθύων. Επίσης, η χημική σύσταση της τροφής ήταν πλούσια σε πρωτεΐνη (43,9%) ενώ τα ποσοστά λίπους ήταν της τάξης του 15,3%, καλύπτοντας τις διατροφικές απαιτήσεις των ψαριών του πειράματος. Παράλληλα, η συγκεκριμένη τροφή χρησιμοποιήθηκε εξαιτίας της περιεκτικότητας σε άζωτο, το οποίο καθόριζε την ημερήσια παραγωγή της αμμωνίας εντός των αποδεκτών ορίων ώστε να εξασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία των ενυδρείοπονικών συστημάτων του πειράματος.

Η σύσταση της τροφής που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία περιγράφεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χημική σύσταση τροφής που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.

Χημική σύσταση	%
Πρωτεΐνη	43,9
Λιπαρές ουσίες	15,3
Τέφρα	5,9
Ενέργεια	23,2
Υδατάνθρακες *	34,9

*Οι υδατάνθρακες υπολογίστηκαν από την παρακάτω μαθηματική σχέση (Tacon 1990):
$$\text{Υδατάνθρακες (\%)} = 100 - (\text{Ολική Πρωτεΐνη} + \text{ολικά λιπίδια} + \text{Τέφρα}).$$

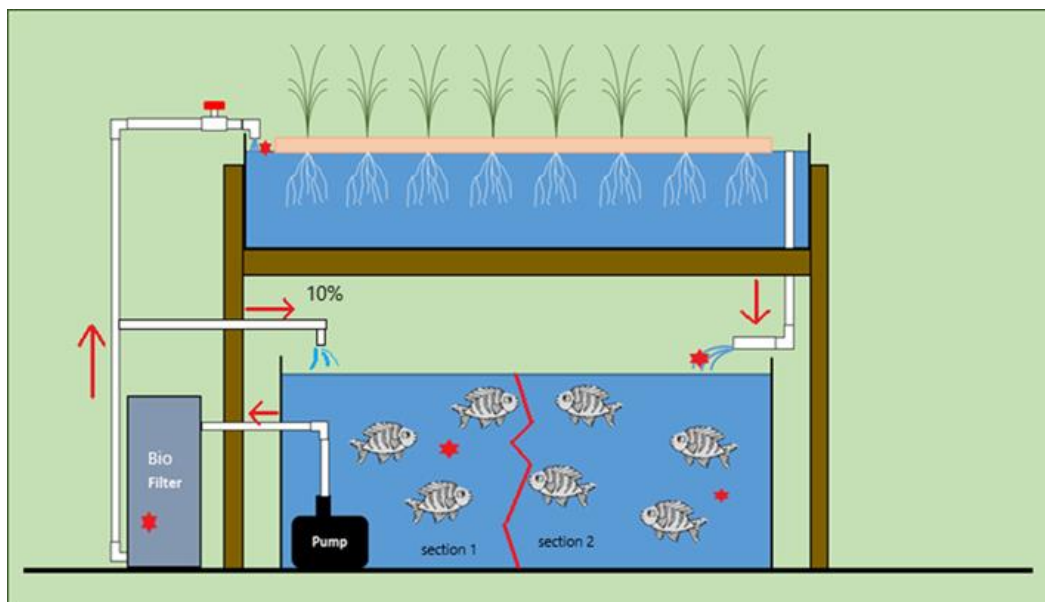
Τα ψάρια ταΐζονταν μέχρι κορεσμού (Grigorakis et al. 2005) και η χορήγηση της τροφής γινόταν τρεις φορές την ημέρα με το χέρι κάθε τέσσερις ώρες. Τα ψάρια διαχωρίστηκαν σε τρεις μεταχειρίσεις ανάλογα με τη συχνότητα χορήγησης τροφής ή στέρησής της.

Στη πρώτη μεταχείριση τα ψάρια σιτίζονταν σε ημερήσια βάση, δηλαδή επτά (7) φορές την εβδομάδα, τρεις (3) φορές ημερησίως κάθε τέσσερις ώρες (μάρτυρας Α). Στη δεύτερη μεταχείριση εφαρμόστηκε πρόγραμμα τετραήμερης (4) ασιτίας με επανασίτιση κάθε τρεις ημέρες (μεταχείριση Β). Στη τρίτη μεταχείριση εφαρμόστηκε επτά ημέρες ασιτία (7) με επανασίτιση κάθε επτά ημέρες (μεταχείριση C).

2.6. Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων νερού και αναλύσεις δειγμάτων.

Οι μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού στα ενυδρειοπονικά συστήματα γίνονταν 2 φορές την εβδομάδα χρωματομετρικά (test kits, API) και πραγματοποιούνταν πριν από τη χορήγηση του πρώτου γεύματος σε όλες τις μεταχειρίσεις, και περιλάμβαναν μετρήσεις ολικής αμμωνίας (TAN), νιτρωδών ιόντων

(NO_2^-), νιτρικών ιόντων (NO_3^-), φωσφορικών ιόντων (PO_4^-), διαλυμένου οξυγόνου (DO), θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) και αλατότητας (ppt). Η μεθοδολογία ανάλυσης των δειγμάτων του νερού βασίστηκε στη μέθοδο που περιγράφεται από τους Liddicoat et al. (1975) και χρησιμοποιούνταν αντιδραστήρια φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη σε τέσσερα σημεία ελέγχου. Στην Εικόνα 7, αποτυπώνονται διαγραμματικά τα σημεία λήψης των δειγμάτων νερού.



Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση ροής του νερού στο πειραματικό ενυδρειοπονικό σύστημα. Με τον κόκκινο αστερίσκο αποτυπώνονται τα σημεία λήψης δειγμάτων του νερού (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Τα σημεία λήψης των δειγμάτων του νερού καθορίστηκαν στην είσοδο και έξοδο του νερού από τις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών και τα υδροπονικά υποσυστήματα καλλιέργειας των φυτών (grow beds) και αναλύονται παρακάτω:

α) ΣΗΜΕΙΟ 1 (σημείο εισόδου-inlet) είναι το σημείο εισροής του νερού από το φίλτρο προς το Grow bet των φυτών.

β) ΣΗΜΕΙΟ 2 (σημείο εξόδου- outlet) είναι το σημείο εκροής του νερού από το grow bed και έρρε προς τις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών.

γ) ΣΗΜΕΙΟ 3 είναι το σημείο όπου λαμβάνονταν δείγμα νερού από τις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών για τον προσδιορισμό των νιτρικών ιόντων.

δ) ΣΗΜΕΙΟ 4 (σημείο εισόδου -inlet) είναι το σημείο εκροής του νερού από τις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών στο μηχανικό φίλτρο.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και κάθε δύο φορές την εβδομάδα λαμβάνονταν δείγματα νερού προκειμένου να προσδιορισθεί: η ολική αμμωνία (TAN), τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-), τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-), η θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο DO in (grow bed), DO out (fish tank), τα φωσφορικά (PO_4^{3-} in και out grow bed), PO_4^{3-} (in / out fish tank). Επίσης καταγράφονταν ο όγκος του νερού που συμπληρώνονταν σε κάθε σύστημα ενυδρείοποινας/φίλτρο λόγω εξάτμισης, ή εργασιών καθαριότητας ή προσδιορισμού κατανάλωσης τροφής (υπολείμματα τροφής και κοπράνων από τα ενυδρεία εκτροφής των ψαριών). Τα δείγματα με τα υπολείμματα τροφής και κοπράνων τοποθετούνταν σε ειδικά πλαστικά φιαλίδια, και αφήνονταν στο ψυγείο να καθιζάνουν τα στερεά υπολείμματα, στους 4°C μέχρι να αναλυθούν. Η μέτρηση της αλατότητας γίνονταν με τη χρήση διαθλασίμετρου (Aqua Medic-KERN). Η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) πραγματοποιήθηκε με χρήση ηλεκτρονικού πολύμετρου HACH HQ 40 D.

2.6.1. pH

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

1. καθαρισμός των υάλινων κυψελίδων όγκου 5mL
2. Προσθήκη 5mL από το δείγμα νερού που πρόκειται να αναλυθεί
3. Προσθήκη 3 σταγόνες από το αντιδραστήριο pH Test Solution
4. Ανάδευση του δείγματος για 10 δευτερόλεπτα περίπου
5. Αναμονή για 5 λεπτά

Έλεγχος και σύγκριση του χρώματος που ελάμβανε το δείγμα με την κλίμακα μέτρησης pH.

2.6.2. Ολική αμμωνία (TAN)

Η μέτρηση της ολικής αμμωνίας (T.A.N) (mg/L) (Εικ.8) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη (Liddicoat et al. 1975) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Λήψη δείγματος νερού (5 mL) από τα σημεία που καθορίστηκαν και περιγράφηκαν στην Εικόνα 7
2. Προσθήκη 8 σταγόνων στο δείγμα από το πρώτο διάλυμα Reagent 1 του kit
3. Προσθήκη 8 σταγόνων στο δείγμα από το δεύτερο διάλυμα Reagent 2 του kit
4. Ανακίνηση του δείγματος για 5 sec

5. Αναμονή 5 min
6. Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με το χρωματικό πίνακα για προσδιορισμό του αποτελέσματος.



Εικόνα 8. Αντιδραστήρια μέτρησης ολικής αμμωνίας και έλεγχος χρώματος (Πηγή:Προσωπικό αρχείο).

2.6.3.Νιτρώδη ιόντα (NO₂-)

Τα νιτρώδη ιόντα (mg/L) (Εικ.9) μετριούνταν με τη μέθοδος των αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη (Liddicoat et al.1975) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Λήψη δείγματος νερού (5 mL) από το ενυδρείο των ψαριών
2. Προσθήκη 5 σταγόνων στο δείγμα από το kit
3. Ανακίνηση του δείγματος για 5 sec
4. Αναμονή 5 min
5. Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με το χρωματικό πίνακα για προσδιορισμό του αποτελέσματος.



Εικόνα 9. Αντιδραστήρια μέτρησης νιτρωδών ιόντων και έλεγχος χρώματος (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

2.6.4. Νιτρικά ιόντα

Τα νιτρικών ιόντων (mg/L) (Εικ.10) μετρήθηκαν με τη μέθοδο των αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη (Liddicoat et al.1975) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Λήψη δείγματος νερού (5mL) από τα σημεία που περιγράφονται στην Εικόνα 7
2. Προσθήκη 10 σταγόνων στο δείγμα από το πρώτο διάλυμα Reagent 1 του kit
3. Ανακίνηση του δείγματος για 5 sec
4. Ανακίνηση του δεύτερου διαλύματος του kit για 30 sec
5. Προσθήκη 10 σταγόνων στο δείγμα από το δεύτερο διάλυμα Reagent 2 του kit
6. Ανακίνηση του δείγματος για 1 min
7. Αναμονή 5 min
8. Σύγκριση του χρώματος του δείγματος με το χρωματικό πίνακα για προσδιορισμό του αποτελέσματος.



Εικόνα 10. Αντιδραστήριο μέτρησης νιτρικών ιόντων και έλεγχος χρώματος (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

2.6.5. Φωσφορικά ιόντα

Τα Φωσφορικά ιόντα (mg/L) μετρήθηκαν με τη μέθοδο των αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη (Liddicoat et al.1975) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Καθαρισμός των υάλινων κυψελίδων 5mL.
2. Προσθήκη δείγματος νερού (5mL) από το ενυδρείο.
3. Προσθήκη 6 σταγόνες από το αντιδραστήριο bottle #1 και ανάδευση του δείγματος μέχρι να ομογενοποιηθεί καλά.
4. Προσθήκη 6 σταγόνες από το αντιδραστήριο bottle # 2 αναδεύοντας για ένα περίπου λεπτό μέχρι να επιτευχθεί πλήρης ομογενοποίηση..
5. Η υάλινη κυψελίδα αφήνεται να ηρεμήσει για 3 λεπτά και να χρωματιστεί ανάλογα
6. Έλεγχος και σύγκριση του χρώματος του δείγματος με την κλίμακα μέτρησης των φωσφορικών ιόντων (PO_4^-)

2.7. Ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας και φορτίο επιβάρυνσης

Η επιτυχία της λειτουργίας ενός ενυδρειοπονικού συστήματος πολυκαλλιέργειας ανακυκλούμενου νερού, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ημερήσια ποσότητα παραγωγής της αμμωνίας που προέρχεται από την μεταβολική δραστηριότητα των ψαριών και από τα υπολείμματα της τροφής που δεν καταναλώθηκε στο ενυδρείο εκτροφής. Ο υπολογισμός του ρυθμού παραγωγής της αμμωνίας είναι μείζονος

ενδιαφέροντος για την έρευνά μας καθώς επηρεάζει την ανάπτυξη των φυτικών και ζωικών οργανισμών του συστήματος και καθορίζει την τιμή του φορτίου επιβάρυνσης. Επομένως, θα πρέπει να γνωρίζουμε την συνολική βιομάζα των ψαριών στο σύστημα και την ακριβή ποσότητα της χορηγούμενης τροφής ημερησίως.

Οι Ebeling et al. (2012) και Boxman et al. (2015), αναφέρουν ότι ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας εξαρτάται από τον ρυθμό παροχής της τροφής, την περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη, το κλάσμα του αζώτου που εκκρίνεται ως TAN και τον ρυθμό απέκκρισης της TAN. Η μαθηματική σχέση που συνδέει τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας με τις παραπάνω παραμέτρους, είναι η εξής:

$$P_{TAN} = FA \times PC \times 0,102 / t$$

όπου:

P_{TAN} = Ρυθμός Παραγωγής Αμμωνίας

FA = Ποσότητα τροφής

PC = Περιεκτικότητα πρωτεΐνης της τροφής, εκφρασμένος ως δεκαδικό κλάσμα

t = χρόνος μεταξύ των γευμάτων

Η σταθερά 0,102 (=0,16 x 0,8 x 0,8). στον τύπο είναι το κλάσμα του πρωτεϊνικού αζώτου που εκκρίνεται ως TAN. Αυτό υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κλάσμα του αζώτου σε πρωτεΐνη (0,16) με το κλάσμα του άζωτο στην πρωτεΐνη της τροφής που αφομοιώνεται (0,80) και το κλάσμα του αφομοιωμένου αζώτου που εκκρίνεται (0,80).

Τα κόπρανα απομακρύνονται από τη δεξαμενή πριν αναπτυχθούν τα ετερότροφα βακτήρια και διασπάσουν την άπεπτη πρωτεΐνη που περιέχεται στα κόπρανα ώστε να παραχθεί περισσότερη αμμωνία στο σύστημα. Επίσης το 100% της TAN παράγεται μέσα σε χρόνο 3-4 ώρες μετά το τάισμα. Αυτή η υπόθεση απαιτεί ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ των ταϊσμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 3-4 ώρες, που είναι ο χρόνος απέκκρισης της αμμωνίας.

Το **φορτίο επιβάρυνσης N** (mg/g*d) υπολογίστηκε από τη μαθηματική σχέση που περιγράφηκε από τους Kamstra et al. (1998):

$$N = (TAN_{in} - TAN_{out}) * V_f * 1000 / \text{βάρος τροφής}$$

Όπου:

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

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

V_f = Όγκος δεξαμενής (L)

Η κατανάλωση της αμμωνίας στο σύστημα εκτιμάται δια μέσω του ρυθμού με τον οποίο οξειδώνεται σε νιτρώδη ιόντα και νιτρικά ιόντα και ερμηνεύει τον ρυθμό με τον οποίο η αμμωνία εισέρχεται στο φίλτρο και της ικανότητας που έχει το φίλτρο (αποτελεσματικότητα) να την οξειδώνει. Η αποτελεσματικότητα του φίλτρου είναι το κλάσμα της TAN που απομακρύνθηκε (οξειδώθηκε) με ένα πέρασμά της από το φίλτρο.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας από το φίλτρο εκφράζεται από την παρακάτω σχέση: $RTAN = Q_f \times CTAN \times E$

Όπου:

$RTAN$ = Ρυθμός απομάκρυνσης αμμωνίας

Q_f = Παροχή νερού στο φίλτρο

$CTAN$ = συγκέντρωση αμμωνίας που εισέρχεται στο φίλτρο

E = αποτελεσματικότητα φίλτρου

2.8. Υπολογισμός οξειδωτικής ικανότητας του φίλτρου

Για τον υπολογισμό της οξειδωτικής ικανότητας χρησιμοποιήθηκε η ανίσωση του Hirayama και εφαρμόστηκε για κάθε πειραματική μεταχείριση σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική σχέση (spotte 1992).

$$\sum_{i=1}^p \frac{10 * W_i}{\frac{0,7}{v_i} + \frac{950}{G_i * D_i}} \geq \sum_{i=1}^q (B_j^{0,544} * 0,01) + 0,051 * F$$

Το αριστερό σκέλος της σχέσης, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του βιολογικού φίλτρου να οξειδώνει και να απενεργοποιεί τους τοξικούς μεταβολίτες που παράγονται στο ενυδρείο (οξειδωτική ικανότητα του βιολογικού φίλτρου, mg/min O₂). Το δεξιό μέρος αντιπροσωπεύει το ρυθμό ρύπανσης του νερού από τα ψάρια (mg/min O₂).

W_i (m²) = η επιφάνεια του φίλτρου.

V_i (cm/min) = η ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου του φίλτρου.

D_i (cm) = το πάχος στρώματος του φίλτρου.

p = ο αριθμός των φίλτρων που εξυπηρετούν το σύστημα.

G_i = συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό βαρύτητας χρήσης του υλικού πλήρωσης που απαρτίζουν το φίλτρο και εκφράζεται από τη σχέση:

$$G = \frac{1}{R_1} * X_1 + \frac{1}{R_2} * X_2 + \dots + \frac{1}{R_n} * X_n$$

όπου :

$R_1, R_2, \dots, R_n$ = μέγεθος υλικού πλήρωσης φίλτρου (mm).

X = το ποσοστό βαρύτητας που καταλαμβάνει το κάθε στρώμα του υλικού πλήρωσης στο σύνολο του φίλτρου.

B = βάρος ψαριού (g).

F = Ημερήσια χορηγούμενη ποσότητα τροφής (g).

q = Αριθμός των ψαριών.

Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο υπολογισμού ο αριθμός των ιχθύων καθώς και ο ρυθμός επιβάρυνσης των ψαριών περιγράφονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 2. Οξειδωτική ικανότητα, φορτίο ρύπανσης του βιολογικού φίλτρου.

Ελάχιστος αριθμός ψαριών (άτομα)	20
Μέγιστος αριθμός ψαριών (άτομα)	24
Προσθήκη ψαριών ανά σύστημα (άτομα)	20
Οξειδωτική ικανότητα φίλτρου mg O ₂ /L	0,5927
Συνολικό φορτίο (ζωικό) ρύπανσης mg O ₂ /L	0,5888
Φορτίο ρύπανσης /άτομο mg O ₂ /L	0,0294
Ικανοποίηση συνθήκης Hirayama (mg O ₂ /L)	0,5927>0,5888

2.9. Δείκτες λειτουργίας και αποτελεσματικότητας των συστημάτων ενυδρείοπονίας

Το υδραυλικό φορτίο, ο ρυθμός ανακύκλωσης και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού στο φίλτρο υπολογίστηκαν από τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις (Huguenin & Colt 2002):

Υδραυλικό φορτίο (HLR) = παροχή νερού (Q) /ολική επιφάνεια φίλτρου (W)

Ρυθμός ανακύκλωσης (r) = όγκος ανακύκλωσης/συνολικός όγκος νερού στο ενυδρείο

Υδραυλικός χρόνος παραμονής (t) = επιφάνεια φίλτρου (W) x βάθος νερού x πορώδες υλικού φίλτρου (s)/ παροχή νερού (Q)

Η **αποδοτικότητα του φίλτρου** του κάθε κλειστού συστήματος ενυδρειοπονίας υπολογίστηκε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (Timmons & Losordo 2000):

$$E = \frac{1+(C*R)-C}{C*R}, \text{ όπου:}$$

C = παράγοντας επιτρεπόμενης συγκέντρωσης της αμμωνίας,

R = ποσοστό του νερού που ανακυκλώνεται

Ο **ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας** στο φίλτρο υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (Kamstra et al.1998)

$$AAR = (TAN_{in} - TAN_{out}) * Q * V^{-1} * S^{-1}$$

Όπου:

TAN_{in} = Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m^3)

TAN_{out} = Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m^3)

Q = παροχή νερού (m^3/day)

V = Όγκος φίλτρου (m^3)

S = ειδική επιφάνεια των μέσων (m^2/m^3)

Ο **ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης** της TAN στο φίλτρο (VTR biobiofilter) ($gTAN/m^3/d$) υπολογίστηκε από την παρακάτω μαθηματική σχέση (Kamstra et al.1998)

$$VTR_{\text{φίλτρου}} = (TAN_{in} - TAN_{out}) * K_c * Q/V$$

Όπου:

TAN_{in} = Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m^3)

TAN_{out} = Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m^3)

K_c = Σταθερός αριθμός

Q = Παροχή νερού (m^3/day)

V = Όγκος φίλτρου (m^3)

Ο **ρυθμός μεταβολής της αμμωνίας** από τα φυτά στο υδροπονικά υποσυστήματα επιπλέουσας σχεδίας (TAN retained ($g/m^2/d$)) υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$TAN_{\text{retained}} = Q * (C_{in} - C_{out}) / V - d * \text{βάθος φίλτρου (m)}$$

Όπου:

Q = Παροχή νερού (m^3/day)

C_{in} = Αμμωνία στο σημείο εισόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή

C_{out} = Αμμωνία στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή

V = Όγκος φίλτρου (m^3)

d = Μεταβολή (C_{out}/dt)

Η **ποσοστιαία απορρόφηση** των θρεπτικών συστατικών (NRE, %) υπολογίσθηκε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο, (El -Sayed khater et al. 2023):

$$NRE (\%) = (C_i - C_e) * Q * 24 / n$$

Όπου C_i και C_e : συγκέντρωση θρεπτικού στην είσοδο και έξοδο της υδροπονικής δεξαμενής ή της εξόδου του νερού από το φίλτρο στην περίπτωση της αμμωνίας

Q =παροχή νερού L/h

n = αριθμός φυτών

Ο **ρυθμός απορρόφησης των θρεπτικών** (αμμωνίας, νιτρικών, φωσφορικών ιόντων) από τα φυτά υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Απορρόφηση θρεπτικών (mg min}^{-1} \text{ kg}^{-1}) = (X_{out} - X_{in}) * Q / B_t$$

Όπου:

X_{out} και X_{in} είναι η συγκέντρωση στην έξοδο και είσοδο του νερού ($mg L^{-1}$),

Q είναι η ροή του νερού μέσα στη δεξαμενή ($L min^{-1}$)

B_t είναι η βιομάζα των ψαριών σε κάθε δεξαμενή (kg).

2.10. Ισοζύγιο αμμωνίας

Η εισροή της αμμωνίας στο σύστημα ισούται με την ποσότητα της αμμωνίας που εισέρχεται στο σύστημα διαμέσου της ανακύκλωσης του νερού και υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη συγκέντρωση της TAN με την παροχή του νερού στο σύστημα:

$$(1) \text{ Εισροή} = (Q * CTAN_{in})$$

Όπου,

Q = ρυθμός ροής του ανακυκλούμενου νερού (L/min)

$CTAN_{in}$ = συγκέντρωση TAN στο σημείο εισόδου στην εισροή του νερού στο σύστημα (mg/L)

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας στο σύστημα εκφράζεται με την ποσότητα της αμμωνίας που εξέρχεται από το σύστημα μέσω των αποβλήτων των ψαριών και υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη συγκέντρωση της TAN με το ρυθμό ροής των αποβλήτων. Εάν ο όγκος του συστήματος δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή το σύστημα δεν έχει περίσσεια νερού αλλά ούτε έλλειψη, ο ρυθμός ροής των

αποβλήτων ισούται με το ρυθμό ροής του νερού ανακύκλωσης στο σύστημα και εκφράζεται μαθηματικά με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$(2) \text{ Εκροή} = Q * CTAN_{out}$$

Όπου,

Q = ρυθμός ροής αποβλήτων (= ρυθμός ροής του νερού ανακύκλωσης)

CTAN_{out} = συγκέντρωση TAN στα απόβλητα.

2.10.1. Εκτίμηση των απαιτούμενων ρυθμών ροής ανακύκλωσης με βάση το ισοζύγιο της αμμωνίας

Όταν είναι γνωστές οι τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών στην εξίσωση του ισοζυγίου μάζας της αμμωνίας, μπορεί να υπολογιστεί ο απαιτούμενος ρυθμός ανακύκλωσης ξαναγράφοντας την εξίσωση 2 και χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την εισροή, την εκροή, την παραγωγή και την κατανάλωση της αμμωνίας. Επιλύοντας την προηγούμενη μαθηματική σχέση ως προς τον ρυθμό ροής - ανακύκλωσης, Qf, η εξίσωση 2 εκφράζεται σε μαθηματική μορφή ως εξής:

$$6) (Q \times CTAN_{out}) + (Q_f \times CTAN \times E) = (Q \times CTAN_{in}) + PTAN$$

$$ΕΚΚΡΟΗ + ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ = ΕΙΣΡΟΗ + ΠΑΡΑΓΩΓΗ$$

και μετασχηματίζεται σε

$$(5): (7) \quad Q_f = (Q \times CTAN_{in}) + PTAN - (Q \times CTAN_{out}) / CTAN \times E$$

όπου:

Q: είναι ο ρυθμός ανανέωσης του νερού που είναι της τάξης 5-10% του όγκου του συστήματος ανά ημέρα

CTAN_{in}: είναι η συγκέντρωση της αμμωνίας στο νερό ανανέωσης, η οποία θα πρέπει να είναι μηδενική τιμή ή τιμή πολύ κοντά στο μηδέν. Σε περιπτώσεις όπου το νερό πριν χρησιμοποιηθεί στο σύστημα έχει υψηλά ποσοστά αμμωνίας τότε συνίσταται το νερό αυτό να επεξεργαστεί με φίλτρο έτσι ώστε η CTAN_{in} να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μηδέν.

PTAN: εξαρτάται από τον ρυθμό παροχής της τροφής (FA), την περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη (PC) και από τον χρόνο απέκκρισης της αμμωνίας (t).

Συνίσταται ο υπολογισμός της ποσότητας της τροφής να πραγματοποιείται σύμφωνα με την υψηλότερη βιομάζα του συστήματος.

FA : Βιομάζα ψαριού x Ποσοστό τροφής (% ζώντος βάρους ιχθύος/ημέρα)/
Αριθμός γευμάτων /ημέρα

Η αποτελεσματικότητα του φίλτρου, E, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί μιας και η απόδοσή του είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως η συγκέντρωση της αμμωνίας, η υδραυλική φόρτιση, η επιφάνεια του φίλτρου, το υλικό πλήρωσης του φίλτρου, η θερμοκρασία, το pH, η αλατότητα, η αλκαλικότητα, το DO, τα TSS και ο τύπος του φίλτρου (φίλτρο βυθού, φίλτρο ρευστοποιημένης κλίνης, φίλτρο cartridge κ.λπ.). Ένας από τους λόγους κατασκευής ενός πρότυπου παραγωγικού συστήματος είναι η συλλογή πληροφοριών για την αποτελεσματικότητα του φίλτρου υπό διαφορετικές συνθήκες και ο προσδιορισμός μιας τιμής E που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ισοζυγίου μάζας της αμμωνίας. Ο Peter Van Wyk (2000) αναφέρει ότι υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ένα φίλτρο κατάλληλου μεγέθους θα πρέπει να απομακρύνει (οξειδώνει) περίπου το 50% της TAN στο νερό μόνο με ένα πέρασμα από το φίλτρο. Στην πραγματικότητα, το φίλτρο δεν αποτελεί το μοναδικό μέρος στο σύστημα όπου λαμβάνει χώρα η βιοχημική διεργασία της νιτροποίησης.

Ο Losordo (1998), αναφέρει ότι το 30% της νιτροποίησης σε ένα τυπικό κλειστό σύστημα υδατοκαλλιέργειας λαμβάνει χώρα εκτός του φίλτρου. Εξαιτίας αυτού, η μεθοδολογία που περιγράφεται τείνει να υπερεκτιμήσει το απαιτούμενο ποσοστό ανακύκλωσης κατά περίπου 30%. Ωστόσο, εάν τα περιττώματα (κόπρανα) απομακρύνονται άμεσα διαμέσου σιφωνισμού από το σύστημα, τότε η ποσότητα της αμμωνίας που θα απομακρύνεται από το φίλτρο, θα πρέπει να είναι υψηλότερη από το 30%.

2.11. Στατιστική ανάλυση

Οι τιμές που προέκυψαν στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας και αφορούσαν τις σημειακές πηγές επιβάρυνσης των συστημάτων ενυδρείοποιίας με αμμωνία, νιτρώδη ιόντα, νιτρικά ιόντα, και φωσφορικά ιόντα, αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν στατιστικά. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης μονής κατεύθυνσης (one way ANOVA) με επίπεδο σημαντικότητας 5%, κάνοντας χρήση του Tukey test ώστε να συγκριθούν οι διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των διαφόρων παραμέτρων καθώς και χρήση του Tukey b ώστε να προσδιορισθούν οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (Zar 1999). Η ομοιογένεια και η παραλλακτικότητα των μέσων όρων ελέγχθηκαν σύμφωνα με το Levene's test, ενώ η κανονικότητα των μέσων όρων ελέγχθηκε με test

Kolmogorov-Smirnov test. Σε περίπτωση ανομοιογένειας των μέσων όρων εφαρμόστηκε η μη παραμετρική ανάλυση kruskal wallis με επίπεδο σημαντικότητας 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως M.O $\pm$ SEM.

3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αβιοτικοί παράγοντες

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση δεδομένων της ποιότητας του νερού στα ενυδρειοπονικά συστήματα για όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Πιο αναλυτικά, ο πίνακας 3 παρουσιάζει τις μέσες συγκεντρώσεις των ανόργανων θρεπτικών συστατικών και κυρίως της ολικής αμμωνίας (TAN, mg/L), των νιτρωδών ιόντων (NO_2^- , mg/L), των νιτρικών ιόντων (NO_3^- mg/L), του pH και του διαλυμένου οξυγόνου (DO mg/L) για όλες της ημέρες που διήρκησε η πειραματική διαδικασία (75 ημέρες).

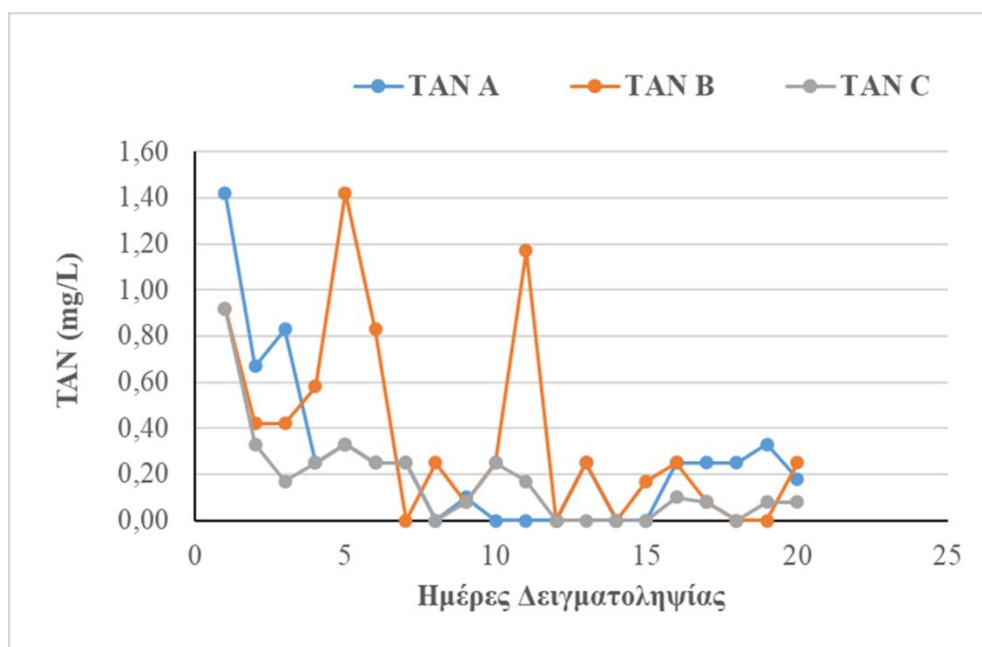
Οι παράμετροι TAN, και το pH δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p > 0.05$) σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις για όλο το διάστημα που διήρκησε η καλλιέργεια (74 ημέρες). Τα νιτρώδη ιόντα παρουσιάζουν στατιστικά τη μεγαλύτερη τιμή στην μεταχείριση Α συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις Β και Γ (ANOVA, $p < 0.05$) (Πιν.3). Τα νιτρικά ιόντα ($\text{NO}_3^-_{\text{in}}$) στο σημείο ελέγχου στην είσοδο του νερού στο υδροπονικό υποσύστημα καλλιέργειας, καθώς και στο σημείο ελέγχου στην έξοδο του νερού από το υδροπονικό υποσύστημα καλλιέργειας της σαλικόρνιας ($\text{NO}_3^-_{\text{out}}$) και το διαλυμένο οξυγόνο (DO), παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$) μεταξύ των τριών πειραματικών μεταχειρίσεων (Πιν.3). Συγκεκριμένα, τα $\text{NO}_3^-_{\text{in}}$, σημείωσαν στατιστικά μεγαλύτερες τιμές στις μεταχειρίσεις Β και C (ANOVA, $p < 0.05$) συγκριτικά με τη μεταχείριση Α. Τα $\text{NO}_3^-_{\text{out}}$ παρουσίασαν στατιστικά μεγαλύτερη τιμή στη μεταχείριση Α, (ANOVA, $p < 0.05$) (Πιν.3). Επιπλέον, οι μέσες τιμές του διαλυμένου οξυγόνου ήταν στατιστικά μεγαλύτερες στο σύστημα Α σε σχέση με την Μεταχείριση Β και C οι οποίες σημείωσαν παρόμοιες συγκεντρώσεις οξυγόνου (ANOVA, $p < 0.05$) (Πιν.3).

Πίνακας 3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά νερού στα ενυδρείοπονικά συστήματα για τις 74 ημέρες συγκαλλιέργειας της τσιπούρας, του λαβρακιού και της σαλικόρνια σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις (Μάρτυρας A, Μεταχείριση B, Μεταχείριση C).

	Μεταχείριση A	Μεταχείριση B	Μεταχείριση C
TAN (mg/L)	0.36±0.07 ^a	0.43±0.08 ^a	0.36±0.08 ^a
NO₂⁻-N	0.38±0.06 ^b	0.22±0.05 ^{ab}	0.20±0.04 ^a
NO₃⁻-N_{in} (mg/L)	120,7 ± 5,82 ^a	142,7 ± 5,44 ^b	139,00 ± 3,75 ^b
NO₃⁻-N_{out} (mg/L)	118,33 ± 5,76 ^a	136,67 ± 5,61 ^b	133,67 ± 4,14 ^b
DO	7,79 ± 0,09 ^a	7,58 ± 0,09 ^b	7,43 ± 0,06 ^b
pH	6,18 ± 0,08 ^a	6,16± 0,05 ^a	6,23 ± 0,05 ^a
NRE (gr/d plant)	1,82 ± 0,09 ^a	2,45 ± 0,1 ^b	2,62 ± 0,1 ^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=20).

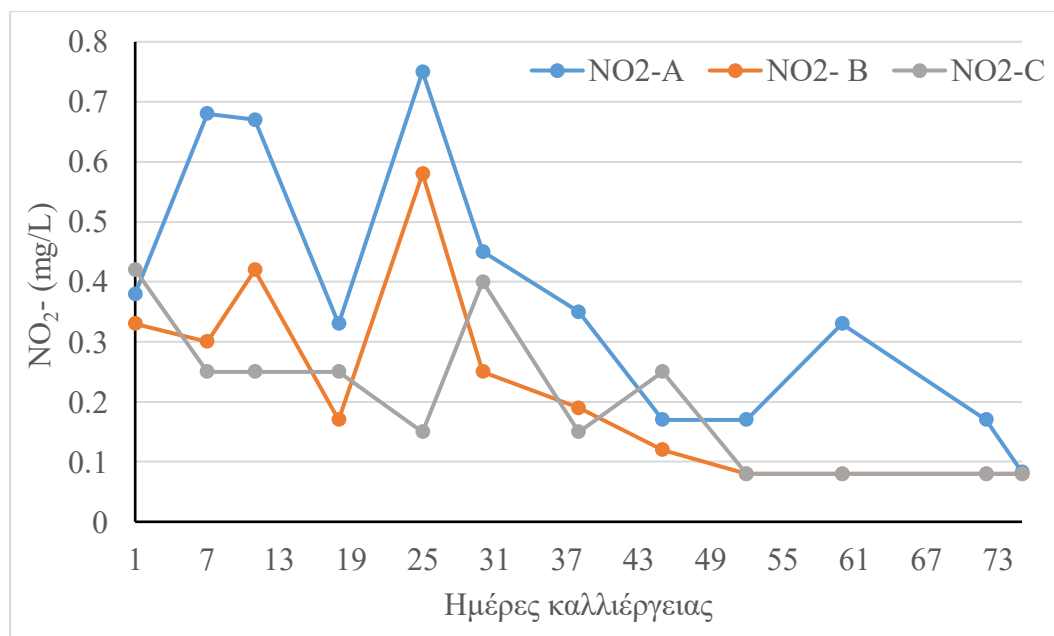
Η μεταβολή της συνολικής αμμωνίας TAN των ενυδρείοπονικών συστημάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 για κάθε πειραματική μεταχείριση.



Σχήμα 1. Διάγραμμα μεταβολής της ολικής αμμωνίας TAN στο σημείο εισόδου του νερού στο Growbed για τις μεταχειρίσεις A, B, και C καθ' όλη τη διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας.

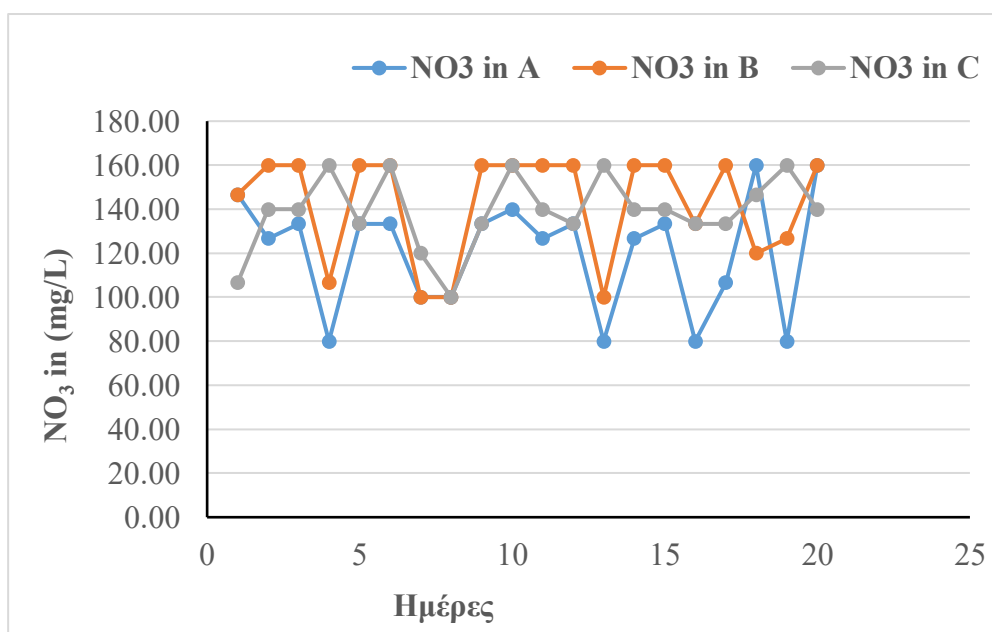
Στο Σχήμα 1, αποτυπώνεται η διακύμανση της ολικής αμμωνίας στο σημείο εισόδου του νερού στο Growbed η οποία παρουσιάζει αυξομειώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας με την μέση τιμή να κυμαίνεται από $0,28 \pm 0,08$ mg/L για τη μεταχείριση A, $0,37 \pm 0,09$ mg/L για τη μεταχείριση B και $0,17 \pm 0,05$ mg/L για την μεταχείριση C. Πιο αναλυτικά, την 5^η και 11^η ημέρα δειγματοληψίας η αμμωνία στα συστήματα της μεταχείρισης B σημείωσε τις υψηλότερες τιμές της, 1,42 mg/L και 1,17 mg/L αντίστοιχα. Την 12^η ημέρα δειγματοληψίας έως την 20^η ημέρα, η TAN και για τις τρεις μεταχειρίσεις φαίνεται να ακολουθεί μία τάση ελαχιστοποίησης με τιμές μικρότερες από 0,40 mg/L.

Τα NO_2^- διακυμάνθηκαν από 0.38 ± 0.06 mg/L για την Μεταχείριση A, 0.22 ± 0.05 mg/L για την Μεταχείριση B και 0.20 ± 0.04 mg/L για την Μεταχείριση C, χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$). Με την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών ιόντων της Μεταχείρισης A, σημείωσαν απότομη μείωση ενώ οι συγκεντρώσεις των NO_2^- στις Μεταχειρίσεις B και C εμφάνισαν μία τάση ομαλών αυξομειώσεων. Επιπλέον, την 11^η ημέρα μέτρησης, η Μεταχείριση B σημείωσε τη μέγιστη τιμή της ίση με 1,17 mg/L ενώ η Μεταχειρίσεις A και B, από την 3^η έως την 20^η ημέρα μέτρησης, έλαβαν τιμές μικρότερες από 1 mg/L (Σχ.2).



Σχήμα 2. Διάγραμμα μεταβολής των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-) στα ενυδρειοπονικά συστήματα με ανακυκλοφορία νερού για τις πειραματικές μεταχειρίσεις A, B και C κατά την διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας.

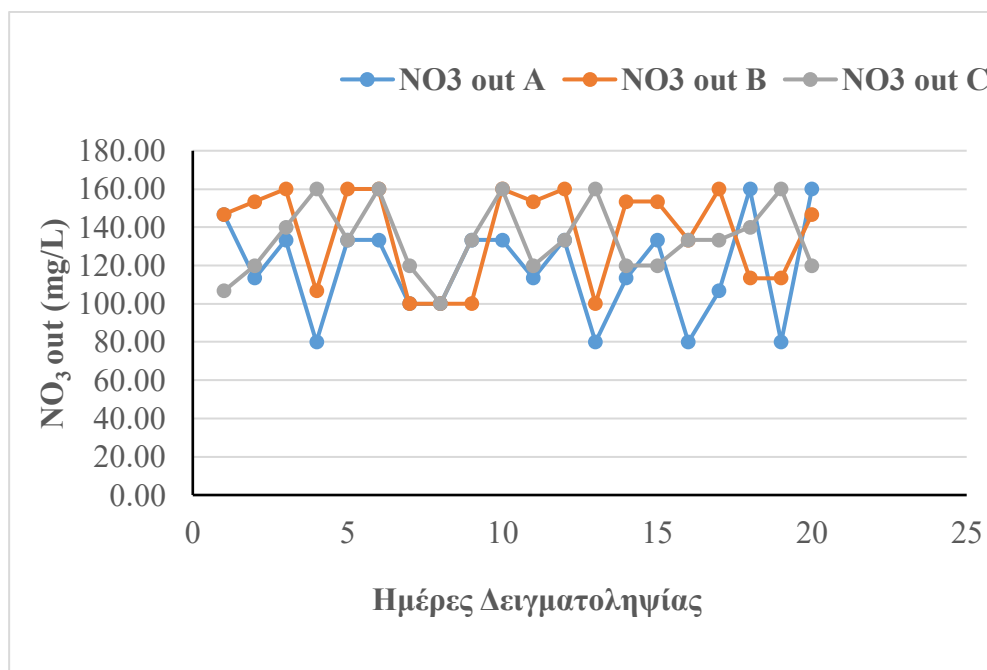
Οι μέσες συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στη θέση εισόδου του νερού στα υδροπονικά υποσυστήματα ανάπτυξης των φυτών, παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$) και κυμάνθηκαν για τις τρεις μεταχειρίσεις από $142,7 \pm 5,44$ mg/L έως $139,00 \pm 3,75$ mg/L, για τη Μεταχείριση B και C, αντίστοιχα. Αντίθετα, στη Μεταχείριση A η τιμή ήταν της τάξης των $120,7 \pm 5,82$ mg/L (Πιν.3). Από τις πρώτες ημέρες των δειγματοληψιών, παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις σε όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ τα ενυδρεία της μεταχείρισης A σημείωσαν τις χαμηλότερες μέσες τιμές αμμωνίας σε σχέση με τις μεταχειρίσεις B και C (Σχ.3).



Σχήμα 3: Διάγραμμα μεταβολής των νιτρικών ιόντων (NO_3^- in) στο σημείο εισόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή Growbed ανάπτυξης των φυτών σε όλες τις μεταχειρίσεις (Μεταχείριση A, Μεταχείριση B, Μεταχείριση C) κατά τη διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας (20 ημέρες).

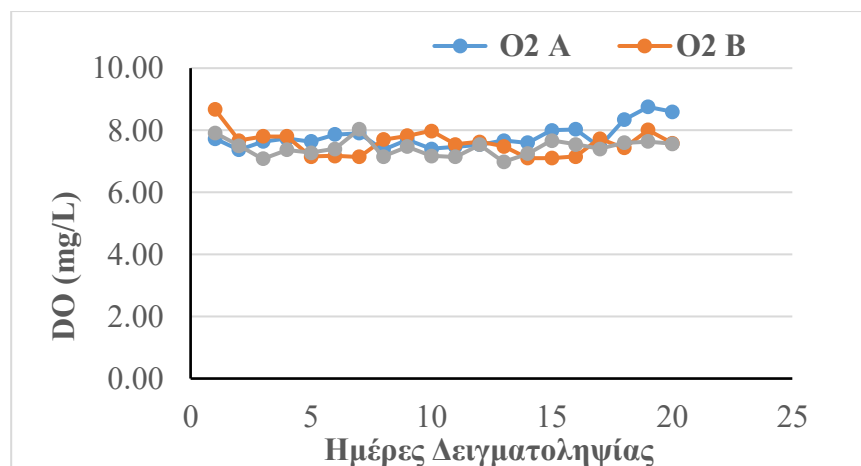
Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στη θέση εξόδου του νερού NO_3^- out από την υδροπονική δεξαμενή ανάπτυξης των φυτών, παρουσίασαν παρόμοια τάση μεταβολής καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας με στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$). Συγκεκριμένα, η μέση τιμή για την Μεταχείριση A ήταν $118,33 \pm 5,76$ mg/L, για την Μεταχείριση B ήταν $136,67 \pm 5,61$ mg/L ενώ για την Μεταχείριση C ήταν $133,67 \pm 4,14$ mg/L. Οι μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στη Μεταχείριση A, παρατηρήθηκαν την 18^η και 20^η ημέρα δειγματοληψίας ενώ παράλληλα στην ίδια μεταχείριση σημειώθηκαν οι

χαμηλότερες τιμές με 80 mg/L. Η μεταβολή των συγκεντρώσεων των NO_3^- out στις Μεταχειρίσεις B και C, παρουσίασαν αυξομειώσεις και κυμάνθηκαν από 100 mg/L έως 160 mg/L (Σχ.4).



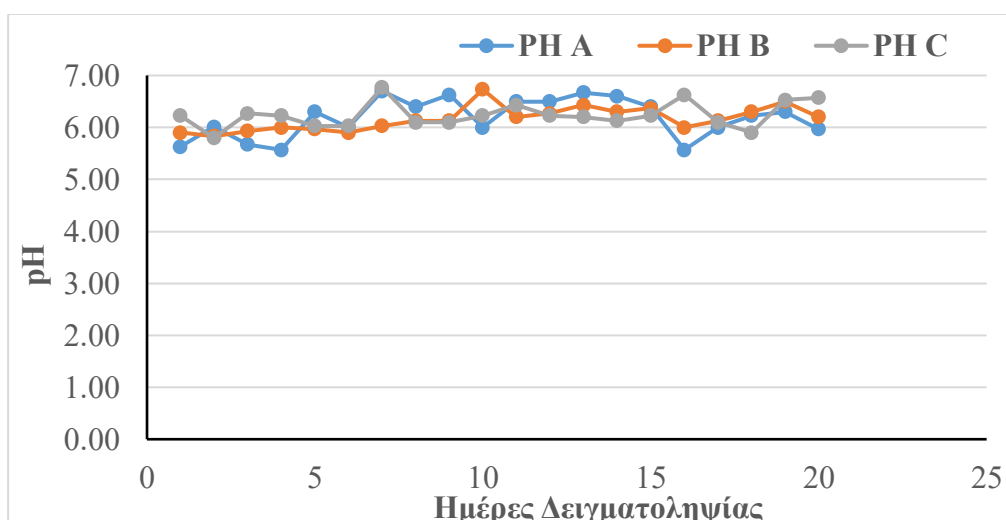
Σχήμα 4. Διάγραμμα μεταβολής των νιτρικών ιόντων (NO_3^- out) στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας της *Salicornia* του ενυδρείοπονικού συστήματος στις τρεις μεταχειρίσεις (Μεταχείριση A, Μεταχείριση B, Μεταχείριση C) κατά τη διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας (20 ημέρες).

Το διαλυμένο οξυγόνο (O_2) στα συστήματα ενυδρείοπονίας σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις A, B και C παρουσιάζει μία τάση μείωσης καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, με εξαίρεση την 19^η ημέρα μέτρησης όπου παρουσίασε απότομη αύξηση στην Μεταχείριση A και στη συνέχεια μειώνεται. Στις Μεταχειρίσεις B και C παρατηρούνται αυξομειώσεις στις τιμές του οξυγόνου, ακολουθώντας κατά κύριο λόγο πτωτική τάση από την 1^η έως την τελευταία ημέρα του πειράματος (Σχ.5). Το διαλυμένο οξυγόνο παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές σε όλες τις μεταχειρίσεις καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας (ANOVA, $p < 0.05$). η μέση τιμή του οξυγόνου για τις ενυδρείοπονικές δεξαμενές της Μεταχείρισης A ήταν $7,79 \pm 0,09$ mg/L ενώ η μέση τιμή του οξυγόνου για την Μεταχείριση B και C ήταν $7,58 \pm 0,09$ mg/L και $7,43 \pm 0,06$ mg/L, αντίστοιχα (Πιν.3).



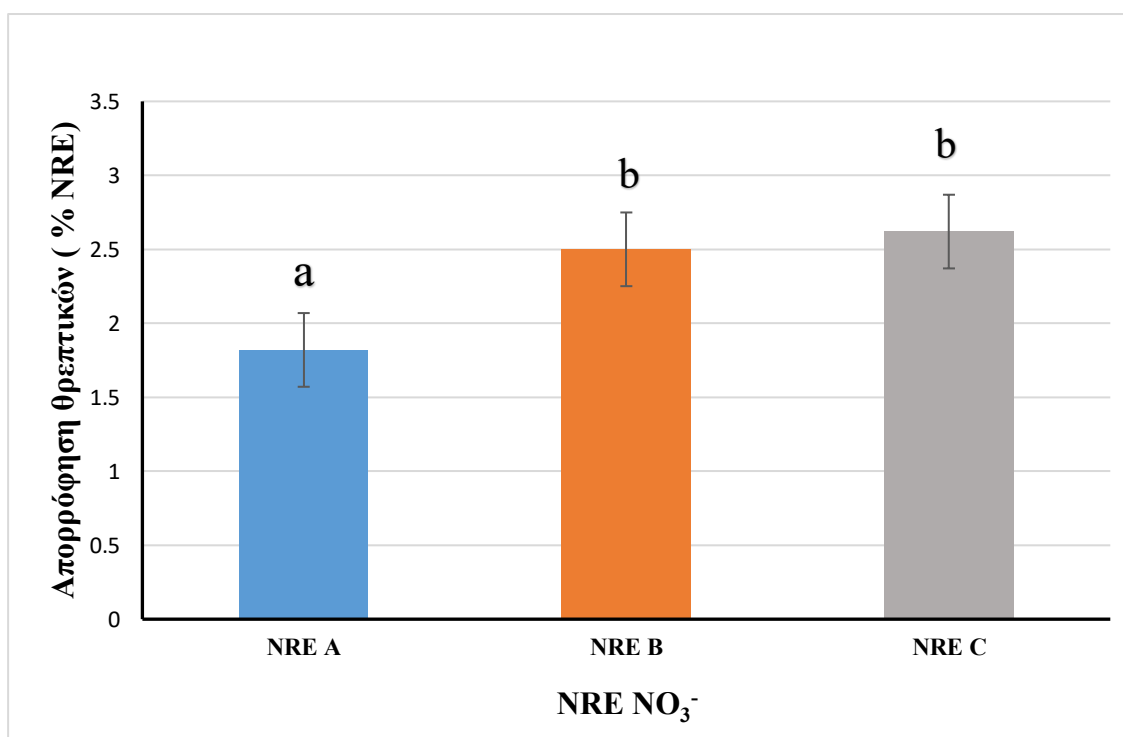
Σχήμα 5. Διάγραμμα μεταβολής του διαλυμένου οξυγόνου (DO, O₂) στα ενυδρειοπονικά συστήματα ανακυκλοφορίας νερού για τις πειραματικές μεταχειρίσεις A, B και C καθ' όλη τη διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας (20 ημέρες).

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή του pH στις δεξαμενές εκτροφής της τσιπούρας και λαβρακιού για τα ενυδρειοπονικά συστήματα ημερήσιας σίτισης (Μεταχείρισης A), μερικής ασιτίας (Μεταχείριση B) και ασιτίας για μία εβδομάδα (Μεταχείριση C) αντίστοιχα. Το pH καθ' όλο το διάστημα της πειραματικής εκτροφής ακολούθησε μια σταδιακή αύξηση των τιμών στις μεταχειρίσεις B και C με τις τιμές να κυμαίνονται από 5,8 την 2η ημέρα μέτρησης έως 6,77 που ήταν η μέγιστη τιμή. Το pH στη Μεταχείριση A σημείωσε την μικρότερη τιμή 5,57 σε σχέση με τις άλλες δύο Μεταχειρίσεις την 4η και 16η ημέρα δειγματοληψίας.



Σχήμα 6. Διάγραμμα μεταβολής του pHFT στα ενυδρειοπονικά συστήματα ανακυκλοφορίας νερού για τις Μεταχειρίσεις A, B και C κατά την διάρκεια των ημερών δειγματοληψίας (20 ημέρες).

Υπολογίστηκε επίσης η ποσοστιαία απορρόφηση (NRE, %) των νιτρικών ιόντων NO_3^- στα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού της υδροπονικής δεξαμενής καλλιέργειας της *Salicornia* στο υφάλμυρο σύστημα ενυδρείοπονίας. Οι μέσες τιμές της απορρόφησης των νιτρικών ιόντων παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των πειραματικών μεταχειρίσεων (ANOVA, $p < 0.05$), με τη μεταχείριση A να παρουσιάζει στατιστικά μικρότερη απορρόφηση στα NO_3^- . (NRE A = $1,82 \pm 0,09$ gr/d plant) (Πιν.1, ANOVA, $p < 0.05$). Οι μέσες τιμές NRE διακυμάνθηκαν από $1,82 \pm 0,09$ gr/d plant για τη Μεταχείριση A, $2,45 \pm 0,1$ gr/d plant για τη μεταχείριση B και $2,62 \pm 0,1$ gr/d plant στη Μεταχείριση C.



Σχήμα 12. Μέση απορρόφηση των νιτρικών ιόντων (NRE, %) από κάθε υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας της σαλικόρνιας στις πειραματικές μεταχειρίσεις. Οι μπάρες σφάλματος δείχνουν την τυπική απόκλιση. Όμοια γράμματα πάνω από τις μπάρες δεν δείχνουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων (ANOVA, $p > 0,05$).

3.2. Απόδοση ενυδρείοπονικών συστημάτων

Η αποτελεσματικότητα και η απόδοση του βιολογικού φίλτρου (E) στα ενυδρείοπονικά συστήματα, ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας (AAR), το φορτίο επιβάρυνσης (N) και ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο (VTR) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις πειραματικές μεταχειρίσεις

(ANOVA, $p>0,05$), (Πίνακας 4.). Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (PTAN) και ο ρυθμός μεταβολής της αμμωνίας (TAN retained), παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p<0,05$), (Πίνακας 4.)

Πίνακας 4. Απόδοση του φίλτρου στα τρία συστήματα ενυδρείοπονίας κατά τη μεταχείριση A, B και C καθ' όλο το διάστημα της πειραματικής διαδικασίας (75 ημ).

	Μεταχείριση A	Μεταχείριση B	Μεταχείριση C
Αποδοτικότητα φίλτρου E	0,91±0,53 ^a	1,08 ± 0,49 ^a	0,65±0,33 ^a
Ρυθμός παραγωγής αμμωνίας PTAN, mg/L	8,14 ± 0,98 ^b	5,59 ± 0,45 ^a	6,076 ± 0,22 ^a
Ρυθμός Οξείδωσης αμμωνίας AAR gr/m²/day	0,09 ± 0,04 ^a	0,08 ± 0,02 ^a	0,06 ± 0,02 ^a
Ογκομετρικός Ρυθμός Οξείδωσης αμμωνίας φίλτρου (VTR, g TAN/m³/d)	4,15 ± 0,79 ^a	5,43 ± 0,47 ^b	4,64 ± 0,93 ^{ab}
Ρυθμός μεταβολής αμμωνίας στις υδροπονικές δεξαμενές TAN retained (g/m²/day)	2,84 ± 0,541 ^a	5,65 ± 1,07 ^b	2,74 ± 0,58 ^a
Φορτίο επιβάρυνσης N (mg N/g τροφής/d)	1,91 ± 1,28 ^a	1,43 ± 0,30 ^a	1,44 ± 0,21 ^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, $p>0.05$).

Πίνακας 5: Ισοζύγιο της αμμωνίας στα συστήματα ενυδρείοπονίας καθ' όλη την πειραματική διαδικασία

	Μεταχείριση A	Μεταχείριση B	Μεταχείριση C
input ammonia (Q*CTANin) + PTAN	15,51±1,34 ^a	11,32±0.59 ^b	12,80±0.16 ^b
output ammonia (Q*CTANout) + RTAN	10.03±1.55 ^a	19.19±1.09 ^b	15.52±1.39 ^b

Πιο αναλυτικά, η αποδοτικότητα του φίλτρου παρουσίασε τη μικρότερη τιμή στην μεταχείριση C ($0,65 \pm 0,33$) ενώ στις μεταχειρίσεις A ($0,91 \pm 0,53$) και B ($1,08 \pm 0,49$) οι τιμές ήταν μεγαλύτερες. Ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας (AAR) παρουσίασε τιμές που κυμαίνονταν από $0,09 \pm 0,04$ gr/m²/day κατά την μεταχείριση A, $0,08 \pm 0,02$ gr/m²/day για τη μεταχείριση B και $0,06 \pm 0,02$ gr/m²/day στη μεταχείριση C ($0,06 \pm 0,02$ gr/m²/day).

Το φορτίο επιβάρυνσης παρουσίασε μεγαλύτερη τιμή κατά τη μεταχείριση C ($1,44 \pm 0,21$ mg N/g τροφής/d) ενώ μικρότερες ήταν οι τιμές στη μεταχείριση A ($1,91 \pm 1,28$ mg N/g τροφής/d) και B ($1,43 \pm 0,30$ mg N/g τροφής/d) αντίστοιχα (Πιν.4).

Ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο (VTR) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά τις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA, $p > 0,05$) και οι τιμές που παρατηρήθηκαν ήταν κατά μέσο όρο $4,15 \pm 0,79$ g TAN/m³/d για τη μεταχείριση A, $5,43 \pm 0,47$ g TAN/m³/d για τη μεταχείριση B και $4,64 \pm 0,93$ g TAN/m³/d για τη μεταχείριση C (Πιν.4).

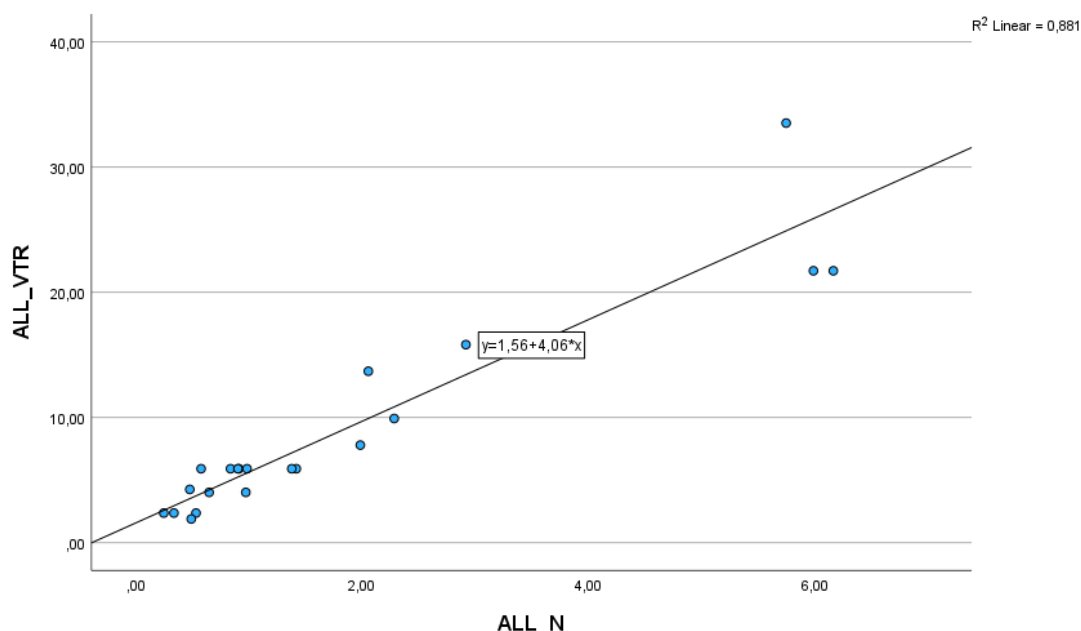
Ο ρυθμός παραγωγής αμμωνίας PTAN παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές και ήταν μεγαλύτερος (ANOVA, $p < 0,05$) στην μεταχείριση A ($8,14 \pm 0,98$ mg/L) σε σχέση με τη μεταχείριση B ($5,59 \pm 0,45$ mg/L) και C ($6,076 \pm 0,221$ mg/L) που ήταν μικρότερος (Πιν.4).

Ο ρυθμός μεταβολής της αμμωνίας στις υδροπονικές δεξαμενές (TAN retained) παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά τις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA, $p < 0,05$). Στατιστικά η μεγαλύτερη τιμή του ρυθμού μεταβολής της αμμωνίας στις υδροπονικές δεξαμενές καλλιέργειας της σαλικόρνιας παρατηρήθηκε στη μεταχείριση B ($5,65 \pm 1,07$ g/m²/day) σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις A ($2,84 \pm 0,54$ g/m²/day) και C ($2,74 \pm 0,58$ g/m²/day) που ήταν μικρότερη (ANOVA, $p < 0,05$, Πιν. 4).

Η συσχέτιση του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας (VTR) και του φορτίου επιβάρυνσης (N) των ενυδρειοπονικών συστημάτων για το σύνολο των 75 πειραματικών ημερών αποδίδεται γραμμικά σύμφωνα (Σχ.13) με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση (1) που περιγράφει το υπόδειγμα γραμμικής παλινδρόμησης. Αντίστοιχα, η συσχέτιση της αποδοτικότητας του φίλτρου (E) και του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο για το σύνολο των 75 πειραματικών ημερών αποδίδεται γραμμικά σύμφωνα (Σχ.14) με την μαθηματική εξίσωση 2 που περιγράφει το υπόδειγμα γραμμικής παλινδρόμησης.

Ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης (VTR, g TAN/m³/d)= 1,56+4,06*Φορτίο επιβάρυνσης (N), ($R^2=0,881$, $r=0,939$) (1)

Αποδοτικότητα του φίλτρου (E)= -0,35+0,14*Ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας, ($R^2=0,930$, $r=0,964$) (2)

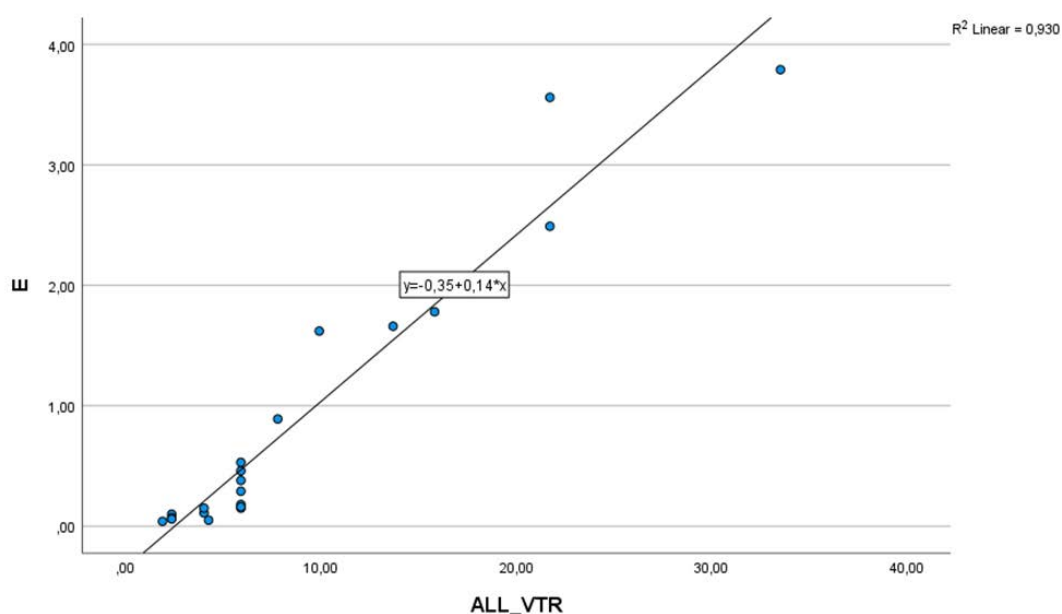


Σχήμα 13. Συσχέτιση του Ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης του φίλτρου (VTR, g TAN/m³/d) με το φορτίο επιβάρυνσης του φίλτρου για τα ενυδρειοπονικά συστήματα σε όλες τις μεταχειρίσεις (A,B,C) για όλο το διάστημα εκτροφής (75 ημέρες).

Τα αποτελέσματα (Σχήμα 13) υποδηλώνουν ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας και του φορτίου επιβάρυνσης στα ενυδρειοπονικά συστήματα σε όλες τις μεταχειρίσεις. Ως εκ τούτου ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας επηρεάζεται στον ίδιο βαθμό από το φορτίο επιβάρυνσης (για κάθε μιλιγραμμάριο αζώτου που παράγεται από ένα γραμμάριο τροφής ημερησίως, αυξάνεται ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας). Από την παραπάνω εξίσωση (1) παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συσχέτισης (r), δείχνει το συντελεστή μεταβλητότητας του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης που ερμηνεύεται από το φορτίο επιβάρυνσης του φίλτρου στα ενυδρειοπονικά συστήματα και ως εκ τούτου όσο πιο ισχυρός είναι ο συντελεστής αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η συσχέτιση που παρατηρείται μεταξύ των μεταβλητών.

Η συνολική μεταβλητότητα του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας ερμηνεύεται από την επίδραση του φορτίου επιβάρυνσης του φίλτρου κατά 93,9%, όταν

οι τσιπούρες και τα λαβράκια ακολουθούν πρόγραμμα σίτισης σε ημερήσια βάση ή πρόγραμμα ασιτίας με επανασίτιση 4 και 7 ημερών, αντίστοιχα.

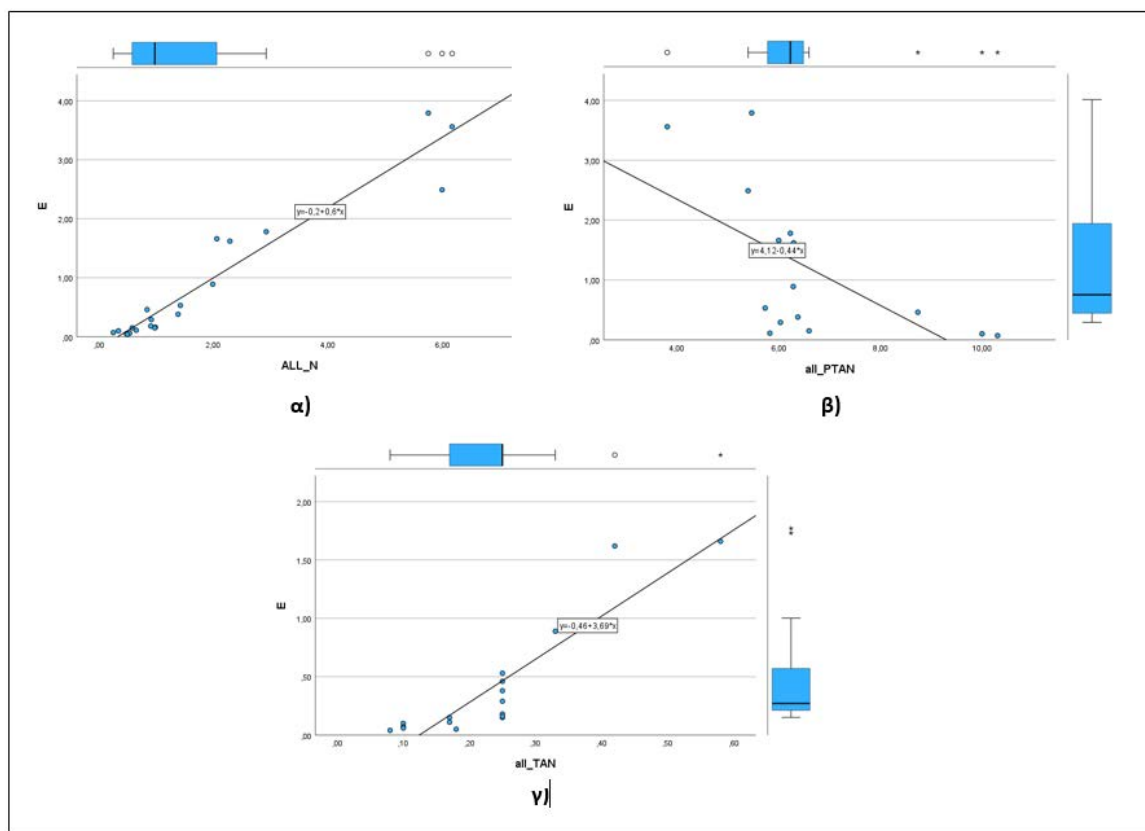


Σχήμα 14. Συσχέτιση της αποδοτικότητας του φίλτρου (E) με τον Ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης του φίλτρου (VTR, g TAN/m³/d) για τα ενυδρειοπονικά συστήματα σε όλες τις μεταχειρίσεις (A,B,C) για όλο το διάστημα εκτροφής (75 ημέρες).

Επιπλέον, τα αποτελέσματα (Σχήμα 14) υποδηλώνουν ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της αποδοτικότητας του φίλτρου και του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας στα ενυδρειοπονικά συστήματα σε όλες τις μεταχειρίσεις. Ως εκ τούτου η αποδοτικότητα του φίλτρου επηρεάζεται στον ίδιο βαθμό από τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας (για κάθε γραμμάριο αμμωνίας που αποβάλλεται, αυξάνεται η αποδοτικότητα του φίλτρου). Από την εξίσωση 2 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συσχέτισης (r), δείχνει το συντελεστή μεταβλητότητας της αποδοτικότητας του φίλτρου που ερμηνεύεται από το ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας στα ενυδρειοπονικά συστήματα και ως εκ τούτου όσο πιο ισχυρός είναι ο συντελεστής αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η συσχέτιση που παρατηρείται μεταξύ των μεταβλητών.

Ο συντελεστής συσχέτισης είναι υψηλός και συνεπάγεται ότι η αποδοτικότητα του φίλτρου επηρεάζεται από τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας (για κάθε γραμμάριο αμμωνίας που αποβάλλεται, αυξάνεται η αποδοτικότητα του φίλτρου). Η συνολική μεταβλητότητα της αποδοτικότητας του φίλτρου ερμηνεύεται από την

επίδραση του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας κατά 96,4% σε όλες τις μεταχειρίσεις (A, B και C).

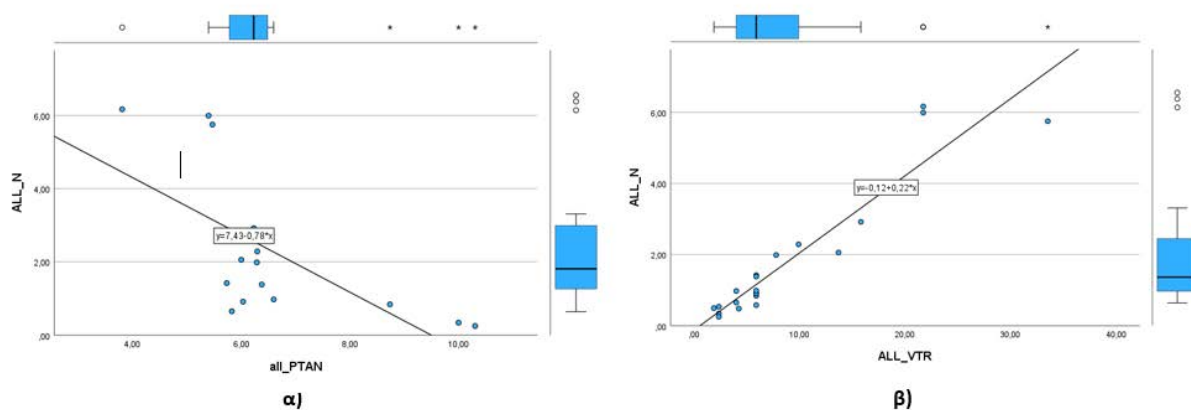


Σχήμα 15. Εξισώσεις παλινδρόμησης της αποδοτικότητας του φίλτρου (E) σε σχέση με α) το φορτίο επιβάρυνσης του φίλτρου (N), β) τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας (PTAN mg/L) και γ) την συνολική συγκέντρωση αμμωνίας (TAN mg/L) στις υδροπονικές δεξαμενές σε όλες τις μεταχειρίσεις 75 ημέρες εκτροφής.

Από το μοντέλο πρόβλεψης (Σχήμα 15) παρατηρούμε ότι η αποδοτικότητα του φίλτρου παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση ($p<0,05$) με την ολική αμμωνία (all TAN) στο νερό των ενυδρείοπονικών συστημάτων, το φορτίο επιβάρυνσης στο φίλτρο (N) και τον ρυθμό παραγωγής αμμωνίας (PTAN). Επιπλέον, από το μοντέλο παλινδρόμησης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 15, είναι δυνατό να υπολογίσουμε την απόδοση του φίλτρου (E) στο σύστημα εφόσον γνωρίζουμε τις συγκεντρώσεις της αμμωνίας στο νερό, τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας (PTAN) στα υδροπονικά συστήματα και το φορτίο επιβάρυνσης (N). Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι αν αυξηθεί το φορτίο επιβάρυνσης κατά μία μονάδα τότε η αποδοτικότητα του φίλτρου αυξάνεται κατά 0,54 μονάδες υπό την προϋπόθεση ότι θα διατηρείται σταθερός ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας και η συγκέντρωση της αμμωνίας στο νερό. Αντίστοιχα, αν αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής της

αμμωνίας κατά μία μονάδα, θα μειωθεί η αποδοτικότητα του φίλτρου κατά 0,1 μονάδες υπό την προϋπόθεση ότι το φορτίο επιβάρυνσης και η συγκέντρωση της αμμωνίας παραμένουν σταθερά. Στην περίπτωση όπου αυξηθεί η συγκέντρωση της αμμωνίας κατά μία μονάδα, η αποδοτικότητα του φίλτρου θα αυξηθεί κατά 2,31 μονάδες υπό την προϋπόθεση ότι θα παραμείνει σταθερός ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας και το φορτίο επιβάρυνσης των ενυδρειοπονικών συστημάτων. Η σημαντική επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών (all TAN, PTAN, N) στην αποδοτικότητα του φίλτρου παρουσιάζει ισχυρή γραμμικότητα ($R^2=0,98$) και περιγράφεται στη παρακάτω εξίσωση:

$$y = 0,54*(N) + 0,104*(PTAN) + 2,318(all\ TAN) - 1,402, (R^2=0,98, r=0,96)$$



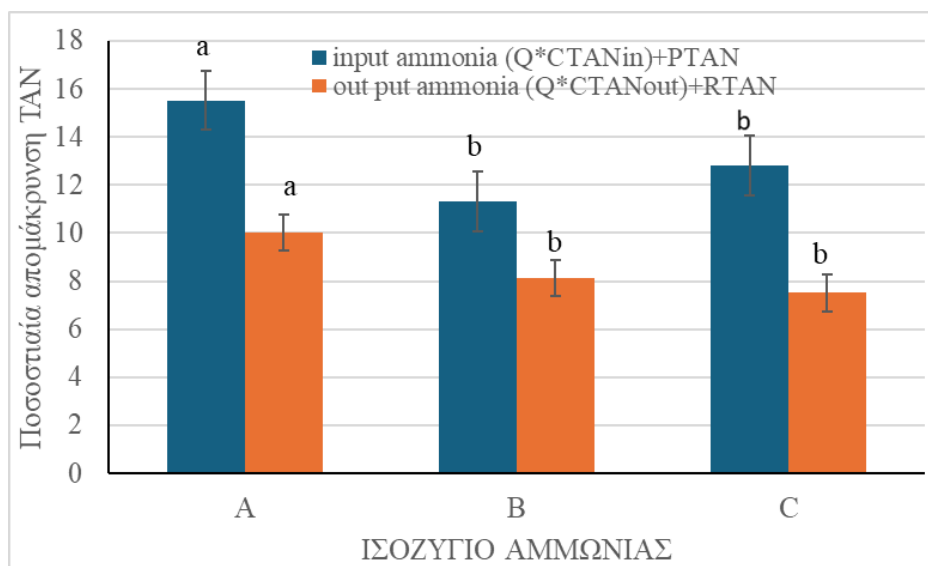
Σχήμα 16. Εξισώσεις παλινδρόμησης του φορτίου επιβάρυνσης (N) σε σχέση με α) τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας (PTAN mg/L) και β) τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο (VTR, g TAN/m³/d) σε όλα τα ενυδρειοπονικά συστήματα κατά τη διάρκεια των 75 πειραματικών ημερών.

Από το μοντέλο πρόβλεψης (Σχήμα 16) παρατηρούμε ότι το φορτίο επιβάρυνσης στο φίλτρο (N) παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση ($p < 0,05$) με τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας (PTAN) και τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο (VTR). Από το μοντέλο παλινδρόμησης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 16, είναι εφικτό να υπολογίσουμε το φορτίο επιβάρυνσης εφόσον γνωρίζουμε τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας και τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο. Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι αν αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας κατά μία μονάδα τότε το φορτίο επιβάρυνσης στο φίλτρο μειώνεται κατά 0,05 μονάδες υπό την προϋπόθεση ότι θα διατηρείται σταθερός ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας. Αντίστοιχα, αν αυξηθεί ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας κατά μία μονάδα, θα αυξηθεί η αποδοτικότητα του φίλτρου κατά 0,23 μονάδες υπό την

προϋπόθεση ότι ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας θα παραμείνει σταθερός. Η σημαντική επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών (PTAN, VTR) στην αποδοτικότητα του φίλτρου παρουσιάζει ισχυρή γραμμικότητα ($R^2=0,946$) και περιγράφεται στη παρακάτω εξίσωση:

$$y = 0,23 \cdot (VTR) - 0,05 \cdot (PTAN) + 0,18 \quad (R^2=0,95, r=0,89)$$

Επιπλέον, υπολογίστηκε το ισοζύγιο της μάζας τη αμμωνίας, το οποίο παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0.05$), μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μεγαλύτερη μέση τιμή για το ισοζύγιο της μάζας αμμωνίας που εισήλθε στα συστήματα, παρουσιάστηκε στη μεταχείριση A και ήταν $15,51 \pm 1,34$. Η μεταχείριση B παρουσίασε την τιμή $11,32 \pm 0,59$ και η μεταχείριση C την τιμή $12,80 \pm 0,16$. Αντίστοιχα, η μεγαλύτερη τιμή του ισοζυγίου της συνολικής αμμωνίας που εξήλθε από τα ενυδρειοπονικά συστήματα παρατηρήθηκε στη μεταχείριση B και ήταν ίση με $19,19 \pm 1,09$. Η μέση τιμή του ισοζυγίου μάζας της αμμωνίας που απομακρύνθηκε από τα συστήματα στη μεταχείριση A ήταν $10,03 \pm 1,55$ και $15,52 \pm 1,39$ στη μεταχείριση C. Στο σχήμα 5 παρατηρούμε ότι η μάζα της αμμωνίας που προστίθεται στα ενυδρειοπονικά συστήματα παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τη μάζα της αμμωνίας που απομακρύνεται.



Σχήμα 5. Διαγραμματική αποτύπωση του ισοζυγίου της αμμωνίας στα πειραματικά συστήματα ενυδρειοπονίας. Οι μπάρες με μπλε απόχρωση συμβολίζουν την αμμωνία που εισέρχεται στο σύστημα (input ammonia (Q*CTANin)+PTAN), οι μπάρες με την πορτοκαλί απόχρωση συμβολίζουν την αμμωνία που απομακρύνεται (output ammonia (Q*CTANout)+RTAN) από το σύστημα προκειμένου να επέλθει ισορροπία. Οι μπάρες με όμοια γράμματα συμβολίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

4.ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η καλλιέργεια φυτικών οργανισμών και η ανάπτυξη ιχθύων στο σύστημα ενυδρειοπονίας με ανακυκλούμενο νερό, αποτελεί μία τεχνική πρακτική η οποία θα αποτελέσει τη φάρμα του μέλλοντος την επόμενη δεκαετία (Mempel et al. 2022). Επιπλέον, τα συστήματα RAS, συμβάλλουν στην εξοικονόμηση των υδάτινων πόρων οι οποίοι εξαντλούνται λόγω της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Vasdravanidis et al. 2022). Μολονότι, το επιστημονικό ενδιαφέρον σχετικά με τα ενυδρειοπονικά συστήματα πολυκαλλιέργειας έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, οι περισσότερες πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί και δημοσιευθεί, αφορούν κυρίως την ενυδρειοπονία γλυκού νερού και όχι σε θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό. Στη συγκεκριμένη μελέτη, επιλέχθηκε η *Salicornia* καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερη ανθεκτικότητα στην αλατότητα, και μπορεί να συγκαλλιεργηθεί σε ενυδρειοπονικό σύστημα πολυκαλλιέργειας με τσιπούρα (*Sparus aurata*) και λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) τα οποία διαθέτουν υψηλή εμπορική και διατροφική αξία.

4.1 Αβιοτικοί παράγοντες

Το εύρος διακύμανσης του pH στην παρούσα εργασία ήταν μεταξύ 5,57 και 6,77 και συμφωνεί με εκείνο που αναφέρουν οι Espinosa et al. (2018) στην έρευνά τους το οποίο κυμαίνονταν από 6,5 έως 6,6. Οι Stathopoulou et al. (2021) καλλιέργησαν το μαρούλι (*Lactuca sativa*) σε συνδυασμό με το ευρωπαϊκό λαβράκι σε γλυκό νερό και αναφέρουν παρόμοιο εύρος τιμών pH (6,75 έως 6,77), με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Επίσης, ελαφρώς υψηλότερο εύρος τιμών pH (6,8 έως 7,1) συγκριτικά με το pH της παρούσας έρευνας αναφέρει στην έρευνά της η Τάσιου (2019) η οποία καλλιέργησε κρίταμο (*Crithmum maritimum*) και λαβράκι σε ανακυκλούμενο υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας με διαφορετικές αλατότητες (8 ppt, 14 ppt και 20 ppt).

Επιπροσθέτως, οι Vlahos et al. (2019) καλλιέργησαν τσιπούρα και κρίταμο σε σύστημα ενυδρειοπονίας και αναφέρουν υψηλότερες τιμές pH (7,54 έως 7,73) συγκριτικά με τα ευρήματα της παρούσας έρευνας. Προηγούμενες μελέτες (Vlahos et al. 2021) οι οποίες αφορούν την καλλιέργεια λαβρακιού και ρόκας σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt αναφέρουν μεγαλύτερες τιμές pH (7,6 έως 7,7) συγκριτικά με τις τιμές pH του παρόντος πειράματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στο πείραμα των Nozzi et al. (2016) καλλιεργήθηκε λαβράκι και σέσκουλο

(*Beta vulgaris*) σε υφάλμυρο νερό αλατότητας 25 ppt και σε γλυκό νερό, αναφέροντας τιμές pH μεταξύ 8 και 8,4.

Το εύρος διακύμανσης για το διαλυμένο οξυγόνο (DO) στο νερό στην παρούσα εργασία ήταν μεταξύ $7,43 \pm 0,06$ mg/L και $7,79 \pm 0,09$ mg/L και φαίνεται να συμφωνεί με τις τιμές (6.33 ± 0.89 mg/L - 6.93 ± 0.80 mg L⁻¹) που αναφέρουν οι Khater *et al.* (2023). Συγκεκριμένα, το πείραμα τους αφορούσε την εκτροφή τιλάπιας και μαρουλιού σε τέσσερα ενυδρειοπονικά συστήματα με υδραυλικό φορτίο 1,2 m/d, 1,8 m/d, 2,4 m/d και 3 m/d αντίστοιχα. Προηγούμενες μελέτες, (Mahabror *et al.* 2022, James *et al.* 2024) παρουσίασαν μικρότερες τιμές DO σε σχέση με το παρόν πείραμα που κυμαίνονταν από $4,1 \pm 0,6$ έως $6,9 \pm 0,4$ mg/L κατά την εκτροφή γατόψαρου και φτέρης (*Azolla* spp.) και 4,67 mg/L κατά την εκτροφή τιλάπιας με κινέζικο λάχανο σε συστήματα ενυδρειοπονίας με ανακυκλούμενο νερό. Σύμφωνα με τους Cavalcante *et al.* (2014) και Elsayed (2006), τα όρια ανοχής της τιλάπιας σε διαλυμένο οξυγόνο κυμαίνεται μεταξύ 3 έως 5 mg/L. Οι Khater *et al.* 2023 αναφέρουν ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αυξάνεται με την αύξηση του υδραυλικού φορτίου (HLR).

Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας σε ότι αφορά την TAN δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p > 0.05$) και διακυμάνθηκαν μεταξύ $0,36 \pm 0,07$ mg/L, $0,43 \pm 0,08$ mg/L και $0,36 \pm 0,08$ mg/L με την υψηλότερη αριθμητική τιμή να παρατηρείται στη μεταχείριση B. Οι τιμές της TAN που προέκυψαν από το παρόν πείραμα είναι μεγαλύτερες από εκείνες που αναφέρονται σε προηγούμενες μελέτες (Stathopoulou *et al.* 2021) όπου οι τιμές TAN κυμαίνονταν από 0,12 έως 0,16 mg/L. Επίσης, οι Vlahos *et al.* (2019) αναφέρουν τιμές TAN μεταξύ 0,33 έως 0,39 mg/L.

Οι Vlahos *et al.* (2023), αναφέρουν μικρότερες τιμές TAN (στο σημείο εξόδου του νερού-outlet) (TAN 8ppt: 0.24 ± 0.081 mg/L, TAN 14 ppt: 0.30 ± 0.045 mg/L & TAN 20 ppt: 0.27 ± 0.058 mg/L) σε σύγκριση με εκείνες που προέκυψαν από το παρόν πείραμα για το λαβράκι όταν συγκαλλιεργείται σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας με κρίταμο. Αντίθετα, πρόσφατη έρευνα των Xiating *et al.* (2024) αναφέρει μεγαλύτερες τιμές TAN (6,50 mg/L έως 11,11 mg/L) για την πέρκα (*Scortum barcoo*) όταν καλλιεργείται σε συνδυασμό με τομάτα σε κλειστό ενυδρειοπονικό σύστημα. Επιπλέον, στο πείραμα των Handajani *et al.* (2021), αναφέρθηκαν μικρότερες τιμές συγκέντρωσης της αμμωνίας σε σχέση με την παρούσα έρευνα και αφορούσαν την καλλιέργεια μεξικανικού σπαθόφυτου και γατόψαρου σε ενυδρειοπονικό σύστημα. Συγκεκριμένα οι τιμές που παρουσίασαν, κυμαίνονταν από 0,1 mg/L έως 0,47 mg/L.

Ανάλογα με το ηλικιακό στάδιο των ψαριών διαμορφώνονται και τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια των συγκεντρώσεων αμμωνίας στα ενυδρειοπονικά συστήματα προκειμένου να εξασφαλίζεται η υγιής ανάπτυξη των οργανισμών. Για παράδειγμα, κατά το στάδιο ωρίμανσης των αυγών, οι τιμές TAN θα πρέπει να κυμαίνονται από 0.1–0.3 g-N /m³, κατά το λαρβικό στάδιο η TAN θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,1 g-N /m³ και στο στάδιο των νεαρών ιχθυδίων η TAN θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,5 g-N /m³ (Malone and Beecher, 2000).

Σε ότι αφορά τα νιτρώδη ιόντα, τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας έδειξαν σημαντικά μεγαλύτερη τιμή νιτρωδών ιόντων στη μεταχείριση A σε σχέση με τις μεταχειρίσεις B και C (ANOVA, $p < 0.05$), και διακυμάνθηκαν από 0.38 ± 0.06 mg/L για τη μεταχείριση A, 0.22 ± 0.05 mg/L για τη μεταχείριση B και 0.20 ± 0.04 mg/L για τη μεταχείριση C. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, δεν συμφωνούν με εκείνα που αναφέρει ο Καπετάνιος (2021) όπου συγκαλλιέργησε λαβράκι και αλμύρα (*Salsoda, soda*) σε ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 14 ppt καταγράφοντας μικρότερη τιμή στα νιτρώδη ιόντα της τάξης 0,14 mg/L.

Επίσης, οι Theodorakaki et al. (2021) μελέτησαν την ανάπτυξη της ρόκας και του γάστρου σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας με αλατότητα 2,5 ppt και αναφέρουν τιμές νιτρωδών ιόντων μικρότερες ($0,08 \pm 0,03$ mg/L έως $0,15 \pm 0,05$ mg/L) με εκείνες του παρόντος πειράματος. Αντίθετα, οι Nozzi et al. (2016) αναφέρουν μέση τιμή νιτρωδών ιόντων ίση με 0,01 mg/L η οποία ήταν κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τις τιμές των νιτρωδών ιόντων του παρόντος πειράματος. Επιπλέον, οι Daisuke et al. (2018) καλλιέργησαν κυπρίνο (*Cyprinus carpio*) και πιπεριά (*Capsicum frutescens*) σε κλειστό σύστημα ενυδρειοπονίας και αναφέρουν μικρότερη τιμή νιτρωδών ιόντων (0,04 mg/L) σε σύγκριση με εκείνες του παρόντος πειράματος.

Σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας με ανακύκλωση νερού (RAS), το εύρος ανοχής των αναπτυσσόμενων ψαριών και φυτών, στα νιτρώδη ιόντα κυμαίνεται από 0 έως 1 mg/L (Reyes et al. 2020). Οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών ιόντων στο παρόν πείραμα, εντάσσονται εντός του εύρους ανοχής των ιχθύων στα NO₂⁻.

Οι τιμές των νιτρικών ιόντων στο σημείο εισόδου και εξόδου του νερού στο υδροπονικό σύστημα (Grow bed), ήταν κατά μέσο όρο χαμηλότερες στην μεταχείριση A και υψηλότερες στη μεταχείριση B παρουσιάζοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0,05$). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές που παρατηρήθηκαν στη μεταχείριση A κυμαίνονταν μεταξύ 120,7 mg/L και 118,33 mg/L, στη μεταχείριση B κυμαίνονταν μεταξύ 139,00 mg/L και 133,67 mg/L και στη μεταχείριση C κυμαίνονταν μεταξύ 142,7

mg/L και 136,67 mg/L. Οι τιμές των NO_3^- στην μεταχείριση Α του παρόντος πειράματος συμφωνούν με εκείνες που αναφέρουν οι Kunwong et al. (2024). Πιο αναλυτικά, η ερευνητική τους εργασία αφορούσε την εκτροφή τιλάπιας (*Oreochromis niloticus*) σε ενυδρειοπονικό σύστημα με ανακύκλωση νερού και μέση τιμή συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων παρουσιάστηκε ήταν της τάξης των 118,4 mg/L. Επίσης, τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος διέφεραν σε μεγάλο βαθμό από εκείνες που αναφέρονται από τους Kotzen & Appelbaum (2010), οι οποίοι πραγματοποίησαν εκτροφή τιλάπιας σε υφάλμυρο νερό και ανέφεραν τιμές νιτρικών ιόντων ίσες με 10-20 mg/L. Επιπλέον, οι Vlahos et al. (2019) αναφέρουν μικρότερες τιμές νιτρικών ιόντων που κυμαίνονταν από 76,4 έως 77,2 mg/L.

Προηγούμενες μελέτες (Spotte 1992, Endut et al. 2010, Somerville et al. 2014 Vlahos et al. 2019), αναφέρουν ότι, οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων σε ενυδρειοπονικά συστήματα εκτροφής με ανακύκλωση νερού, υποδηλώνουν την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων. Τα φυτά στο σύστημα ενυδρειοπονίας απορροφούν τα νιτρικά ιόντα, και ως εκ τούτου καθιστούν το νερό εκτροφής καταλληλότερο και χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα διαβίωσης στους υδρόβιους οργανισμούς στο σύστημα. Αυξημένες συγκεντρώσεις στα νιτρικά ιόντα δημιουργούν προβλήματα στην ανάπτυξη των οργανισμών καθώς και στην κυκλοφορία του οξυγόνου στο αίμα (Monsees et al. 2016, Gomez et al. 2020,).

Επίσης, οι Davidson et al. (2014) αναφέρουν ότι, το όριο ανοχής των εκτρεφόμενων ψαριών στα νιτρικά ιόντα κυμαίνεται από 80-100 mg/L. Οι μέσες τιμές απορρόφησης των νιτρικών ιόντων παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των πειραματικών μεταχειρίσεων (ANOVA, $p < 0.05$), με τη μεταχείριση Α να παρουσιάζει στατιστικά μικρότερη απορρόφηση στα NO_3^- με τιμή 1,82 % και τη μεταχείριση Β και C να παρουσιάζει ποσοστό απορρόφησης 2,45 % και 2,62% αντίστοιχα. Η ποσοστιαία απορρόφηση των νιτρικών ιόντων του παρόντος πειράματος, διέφερε σημαντικά σε σχέση με το ποσοστό αξιοποίησης των νιτρικών ιόντων που αναφέρουν στο πείραμα των Gichana et al. (2019) για τον άψινθο (76,03%), την κολοκύθα (67%) και τον αμάρανθο (68,1%) κατά την καλλιέργεια τους σε ενυδρειοπονικό σύστημα. Επιπλέον, στην έρευνα των Handajani et al. (2021), παρατηρήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης των νιτρικών (52,99 %) σε σχέση με το παρόν πείραμα και αφορούσε την συγκαλλιέργεια Μεξικανικού σπαθόφυτου (*Echinodorus palifolius*) και γατόψαρου (*Clarias gariepinus*) σε σύστημα ενυδρειοπονίας με ανακυκλούμενο νερό.

Προηγούμενες μελέτες (Chunjie et al. 2019) αναφέρουν ότι το ποσοστό απορρόφησης στα νιτρικά ιόντα διαφέρει σε σχέση με τις ανάλογες μετρήσεις του παρόντος πειράματος και διακυμάνθηκε από 19,1% έως 21,9%. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν στη συγκαλλιέργεια του Ιαπωνικού μαϊντανού (*Oenanthe javanica*) και του μυριόφυλλου (*Myriophyllum Spicatum*) με τιλάπια (*Oreochromis mossambicus*) και χρυσόψαρο (*Carassius auratus*) σε συστήματα ενυδρείοπονίας με ανακύκλωση νερού. Επιπλέον, στην ερευνητική μελέτη των Xiao-Long et al. (2024), οι οποίοι καλλιέργησαν κυπρίνο και μαρούλι (*Lactuca sativa*) σε σύστημα RAS, αναφέρθηκε υψηλότερο ποσοστό αξιοποίησης του αζώτου συγκριτικά με την παρούσα έρευνα και κυμαίνονταν μεταξύ 28,61% και 33,95%. Τα ενυδρείοπονικά συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά απορρόφησης των νιτρικών ιόντων, αποτελούν μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνική καλλιέργειας καθώς συμβάλλουν στην έκλυση χαμηλότερων ποσοστών N_2O στην ατμόσφαιρα (Xiao-Long et al. 2024).

4.2. Απόδοση ενυδρείοπονικών συστημάτων

Η αποδοτικότητα του φίλτρου στο παρόν πείραμα δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p > 0,05$) και έλαβε τις τιμές $0,91 \pm 0,53$ στη μεταχείριση Α, $1,08 \pm 0,49$ στη μεταχείριση Β και $0,65 \pm 0,33$ στη μεταχείριση C. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα του φίλτρου σε ένα ενυδρείοπονικό σύστημα, εξαρτάται από το ρυθμό παραγωγής αμμωνίας, το ρυθμό απομάκρυνσης της αμμωνίας, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το είδος του εκτρεφόμενου ιχθύος, τη ποσότητα και τη σύσταση της τροφής, το είδος των φυτών που θα καλλιεργηθούν και τη μέθοδος εκτροφής (Colt et al. 2006, Rakocy 2012, Sace & Fitzsimmons 2013, Carneiro et al. 2015, Love et al. 2015, Pinho et al. 2017).

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (PTAN) στο πείραμα που μελετήσαμε, παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA, $p < 0,05$) και ήταν μεγαλύτερος στη μεταχείριση Α με τιμή $8,14 \pm 0,98$ mg/L. Κατά την μεταχείριση Β και C οι τιμές ήταν μικρότερες ($5,59 \pm 0,45$ mg/L, $6,076 \pm 0,22$ mg/L). Οι τιμές της παρούσας έρευνας είναι μεγαλύτερες από τις τιμές ($2,79 \pm 0,34$, $3,03 \pm 0,45$ mg/L) που αναφέρει η Τάσιου (2019), η οποία ανέπτυξε σε ενυδρείοπονικό σύστημα λαβράκι και κρίταμο. Προηγούμενες μελέτες (Κουτράκης 2021) που αφορούσαν την συγκαλλιέργεια ρόκας και λαβρακιού σε ενυδρείοπονικό σύστημα υφάλμυρου νερού με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, παρουσίασαν μικρότερες τιμές ρυθμού παραγωγής της αμμωνίας ($0,37$

mg/L-1,58 mg/L) σε σχέση με τη παρούσα μελέτη. Αξίζει να αναφερθεί πως ο ρυθμός επιβάρυνσης των ενυδρειοπονικών συστημάτων με αμμωνία, εξαρτάται από την χημική σύσταση της χορηγούμενης τροφής, από τη συχνότητα του ταΐσματος και ερμηνεύεται ως η συνολική συγκέντρωση TAN στο σύστημα ημερησίως (Timmons et al. 2001).

Τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος έδειξαν ότι ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης στο φίλτρο (VTR, g TAN/m³/d) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά τις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA, $p > 0,05$) και οι τιμές κυμαίνονταν από $4,15 \pm 0,79$ g TAN/m³/d έως $5,43 \pm 0,47$ g TAN/m³/d. Οι τιμές στο παρόν πείραμα είναι σύμφωνες με εκείνες ($6,44 \pm 1,69$ g TAN/m³/d) που παρουσίασε στη μελέτη της η Theodorakaki 2022 η οποία πραγματοποίησε εκτροφή γάστρου και καλλιέργεια ρόκας σε ενυδρειοπονικό σύστημα με ανακύκλωση νερού. Επιπλέον παρόμοιες τιμές VTR (5,21-6,85 g TAN/m³/d) αναφέρθηκαν και στο πείραμα του Δεβετζόγλου (2020) ο οποίος καλλιέργησε ρόκα και λαβράκι σε υφάλμυρο ανακυκλούμενο σύστημα ενυδρειοπονίας NFT.

Αντίθετα, οι Harwanto et al. (2011) ανέφεραν πολύ μεγαλύτερες τιμές ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας που κυμάνθηκε από 32,1 g/m³/day έως 322,7 g/m³/day και το πείραμά τους αφορούσε την προσθήκη ελεγχόμενων ποσοτήτων αμμωνίας σε ενυδρειοπονικά συστήματα με φίλτρο άμμου, πολυστερίνης και σφαιριδίων αντίστοιχα. Προηγούμενες έρευνες (Kumar et al. 2010) οι οποίες στόχευαν στη μελέτη του ρυθμού νιτροποίησης σε σύστημα RAS με υφάλμυρο ανακυκλούμενο νερό, παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή VTR σε σχέση με την τιμή στο παρόν πείραμα και ήταν $153,3 \pm 4,5$ g TAN/m³/day.

Η εξίσωση παλινδρόμησης μεταξύ του VTR και του φορτίου επιβάρυνσης (N) καθώς επίσης και του VTR με την αποτελεσματικότητα του φίλτρου, επεξηγεί το 93,9%, και 96,4%, της μεταβλητότητας του VTR για τις μεταχειρίσεις A, B και C αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας συμφωνούν με εκείνα των Kumar et al. (2010) οι οποίοι αναφέρουν ποσοστό μεταβλητότητας VTR σε σχέση με το PTAN 86%.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως περιγράφεται στη παρούσα μελέτη η συμβιωτική σχέση των δυο ιχθύων (*Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax*) και της σαλικόρνιας (*Salicornia europaea*) υπό την δοκιμασία ανάπτυξης αντιστάθμισης, αναδεικνύεται εφικτή και βιώσιμη σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα πολυκαλλιέργειας. Η υλοποίηση της παρούσας έρευνας αποτελεί ένα καινοτόμο κομμάτι που δίνει το έναυσμα για την διεξαγωγή περισσότερων ερευνών και τη διεύρυνση των γνώσεων ως προς την ενυδρειοπονική πολυκαλλιέργεια.

Η συγκαλλιέργεια της τσιπούρας και του λαβρακιού που παρουσιάζουν ιδιαίτερη εμπορική αξία καθώς και της σαλικόρνιας ενός αλόφυτου με ισχυρή ανθεκτικότητα σε υψηλές αλατότητες, αποδεικνύεται επιτυχής, με δυνατότητα επίτευξης σημαντικών οικονομικών εισφορών. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από το παρόν πείραμα.

- Η αποδοτικότητα των ενυδρειοπονικών συστημάτων, η απορρόφηση των νιτρικών και ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας είναι μεγαλύτερος κατά τις μεταχειρίσεις όπου στα ψάρια εφαρμόζονταν ασιτία 4 και 7 ημέρες (B και C μεταχείριση).
- Στα συστήματα όπου είχαμε ασιτία για 4 ημέρες παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αποδοτικότητα του φίλτρου και υψηλότερος μεγαλύτερο ρυθμός μεταβολής της αμμωνίας.
- Αντίθετα, όταν τα ψάρια σιτίζονταν καθημερινά, παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη παραγωγή αμμωνίας.
- Υπάρχει ισχυρή θετική συσχέτιση του ογκομετρικού ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας με το φορτίο επιβάρυνσης και την αποδοτικότητα του φίλτρου
- Υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση της αποδοτικότητας του φίλτρου με τον ρυθμό παραγωγής της αμμωνίας, το φορτίο επιβάρυνσης και την συνολική αμμωνία στα συστήματα
- Υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση του φορτίου επιβάρυνσης με τον ρυθμό παραγωγής αμμωνίας και τον ογκομετρικό ρυθμό οξείδωσης
- Το ισοζύγιο της μάζας αμμωνίας είναι μεγαλύτερο στα συστήματα όπου είχαμε καθημερινή σίτιση σε σχέση με τα συστήματα όπου εφαρμόστηκε ασιτία τεσσάρων και επτά ημερών (μεταχείριση B και C).

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Alkemade, F., Suurs, R.A.A., (2012). Patterns of expectations for emerging sustainable technologies. *Technol. Forecast. Soc. Change* 79 (3), 448e456.
- Allsopp, M. H., De Lange, W. J., & Veldtman, R. (2008). Valuing insect pollination services with cost of replacement. *PloS one*, 3(9), e3128.
- Arends R.J., Mancera J.M., Munoz J.L, Wendelaar Bonga J.L., Flik G. (1999). The stress response of the gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) to air exposure and confinement, *Journal of endocrinology*, 163:149–157.
- Behzad, R. K., Hossein, A., A., Hassan E., Nayer, A., K., (2019). Improved growth and salinity tolerance of the halophyte *Salicornia* sp. by co–inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria.
- Boxman, S., Main, K., Nystrom, M., Ergas, S.J., Trotz, M. Aquaponic, (2015), System Produces Red Drum, Saltwater Vegetable Species, *Global Aquaculture Advocate*, pp. 58-60.
- Carmelo Maucieri, Carlo Nicoletto, Giampaolo Zanin, Marco Birolo, Gerolamo Xiccato, Paolo Sambo, Maurizio Borin. (2020). Nitrogen budget in recirculating aquaponic systems with different fish stocking density. Department of Agronomy, Food, Natural resources, Animals and Environment (DAFNAE), University of Padova, Legnaro (PD), Italy.
- Carneiro, P. C. F., Maria, N. A., Nunes, M. U. C., & Fujimoto, R. Y. (2015). Aquaponia: produção sustentável de peixes e vegetais. In: Tavares-Dias, M. and Mariano, W.S. (Org.). *Aquicultura no Brasil: novas perspectivas*, 683-706.
- Chen, S., Timmons, M.B., Aneshansley, D.J. and Bisogni, J.J. (1993). Suspended solids characteristics from recirculating aquaculture systems and design implications. *Aquaculture* 112: 143 – 155.
- Chunjie L., Boyu Z., Pengxuan L., Hongtao S., Linfang L., Yueshu G., Chew T. L., Zhenjia Z., Wei-Min W., (2019). Performance of a pilot-scale aquaponics system using hydroponics and immobilized biofilm treatment for water quality control.
- Chopin, T., Buschmann, A. H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., ... & Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6), 975-986.

- Colt, J., Lamoureux, J., Patterson, R. & Rogers, G. (2006). Reporting standards or biofilter performance studies. *Aquacult. Eng.* 34, 377–388.
- Connolly Keith and Trebic Katjana (2010). Optimization of a Backyard Aquaponic Food Production System. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences Macdonald Campus, McGill University.
- Chunjie Li, Boyu Zhang, Pengxuan Luo, Hongtao Shi, Linfang Li, Yueshu Gao, Chew Tin Lee, Zhenjia Zhang, Wei-Min Wu, (2019). Performance of a pilot-scale aquaponics system using hydroponics and immobilized biofilm treatment for water quality control.
- Daisuke T., Nakamura Y., Tokuzawa H., Hirakata Y., Hatamoto M., Yamaguchi T., (2018). Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage nitrification–denitrification using a down-flow hanging sponge reactor.
- Davidson J., Good C., Welsh C., Summerfelt S.T., (2014). Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Eng.*, 59 (2014), pp. 30-40
- Diver, S. (2006). Aquaponics – Integration of Hydroponics with Aquaculture. ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service (National Center for Appropriate Technology).
- Ebeling, J.M., Timmons, M.B., (2012). Recirculating Aquaculture Systems. In: *Aquaculture Production Systems*, Hoboken, NJ, USA: Tidwell, J.H. Ed, John Willey& Sons.
- ElSayed Abdel-Fattah M., (2006). *Tilapia Culture* (Alexandria: Oceanography Department Faculty of Science Alexandria University
- Elsayed Khater, Adel Bahnasawy, Samir Ahmad Ali, Wael Abbas, (2023). Study on the plant and fish production in the aquaponic system as affected by different hydraulic loading rates Springer Nature.
- 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.
- Endut A, Jusoh A, Ali NA, 2014. Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalin. Water Treat.* 52:744-52.

- Espinosa A., Álvarez A., Albertos P., Guzmán R., Martínez R., (2018). Growth and development of herbaceous plants in aquaponic systems.
- Fang Y, Hu Z, Zou Y, Fan J, Wang Q, Zhu Z, 2017. Increasing economic and environmental benefits of media-based aquaponics through optimising aeration pattern. *J. Clean. Prod.* 162:1111-7.
- Forsberg, O.I. (1997). The impact of varying feeding regimes on oxygen consumption and excretion of carbon dioxide and nitrogen in post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Aquaculture Research* 28: 29 – 41.
- Fronte, B., Galliano, G., Bibbiani, C, (2016). From freshwater to marine aquaponic: new opportunities for marine fish species production. 4th Conference with International Participation Conference VIVUS-on Agriculture, Environmentalism, Horticulture and Floristics, Food Production and Processing and Nutrition <<With Knowledge and Experience to New Entrepreneurial Opportunities>> 20th and 21st April 2016, Biotechnical Centre Naklo, Strahinj 99, Naklo. Slovenia.
- Gichana. Z., Liti.D., Wakibia.J., Ogello. E.,Drexler. S., Meulenbroek. P., Ondiba.R., Zollitsch. W., Waidbacher.H. (2019). Efficiency of pumpkin (*Cucurbita pepo*), sweet wormwood (*Artemisia annua*) and amaranth (*Amaranthus dubius*) in removing nutrients from a smallscale recirculating aquaponic system. *Aquaculture International* 27:1767–1786. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-x>
- Gomez I, Cramp R, Franklin C., (2020). Simultaneous exposure to nitrate and low pH reduces the blood oxygen-carrying capacity and functional performance of a freshwater fish.
- Grigorakis, K., & Alexis, M. N. (2005). Effects of fasting on the meat quality and fat deposition of commercial-size farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) fed different dietary regimes. *Aquaculture Nutrition*, 11(5), 341-344.
- Hagopian, D.S. and Riley, J.G. (1998). A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* 18: 223 – 244.
- Handajani H., Adhywirawan G., Andriawan S., Prasetyo D., Mavuso B. (2021). Evaluation of Efficiency of *Echinodorus palaefolius* (J.F. Macbr.) Involved in the *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) Culture for Water Quality Recovery and Fish Growth Support. Department of Aquaculture, Faculty of Agriculture and

- Animal Science, University of Muhammadiyah Malang, Jl Raya Tlogomas No. 246, Malang, 65144, Indonesia.
- Harwanto D., Sung-Yong O., Jae-Yoon J., (2011). Comparison of the Nitrification Efficiencies of Three Biofilter Media in a Freshwater System.
- Huguenin E, J., and J. Colt. (2002). Design and operating guide for aquaculture seawater systems. 2nd edition. Elsevier Science BV. Sara Burgerhartstraat 25., P.O Box 211,1000., Amsterdam. The Netherlands pp.20-24.
- Hughey, T. (2005). Aquaponics for Developing Countries. *Aquaponics Journal*, Issue 38, pp 16-18.
- Hussain, T., Verma, A. K., Tiwari, V. K., Prakash, C., Rathore, G., Shete, A. P., & Saharan, N. (2015). Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. *Aquaculture International*, 23(1), 369-384.
- Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC, Khanal SK, (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresour. Technol.* 188:92-8.
- James M., Julius O., Mucai M., Geraldine M., (2024). Effects of stocking density and water flow rate on performance, water quality and economic benefits of African catfish larvae (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in the aquaponic system integrated with *Azolla* fern.
- Kamstra A., van der Heul JW and Nijhof M. (1998). Performance and optimization of trickling filter on eel farms. *Aquac. Eng* 17, 175-192.
- Khater E., Bahnasawy A., Ali S., Abbas W., Morsy O., Sabahy A., (2023). Study on the plant and fish production in the aquaponic system as affected by different hydraulic loading rates.
- Kotzen B., Appelbaum S., (2010). An Investigation of Aquaponics Using Brackish Water Resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture* 22(4):297-320
- Kumar R., Valsamma J., Rosamma P., (2010). Nitrification in brackish water recirculating aquaculture system integrated with activated packed bed bioreactor.
- Liddicoat, M. I., Tibhitts, S., & Butler, E. I. (1975). The determination of ammonia in seawater. *Limnology and Oceanography*, 20(1), 131-132.

- Losordo, T. M. P., & Rakocy, J. E. (1998). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems – An Overview of Critical Considerations. Southern Regional Aquaculture Center, Publication No. 451, 1-6.
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Ganello, L., Semmers, K., Thompson, R.E., (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey, *Aquaculture*, vol. 435, pp. 67-74.
- Madigan, Martinko, Parker. (2014). Βιολογία των μικροοργανισμών τόμος I και II, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Mahabror D., Zulkarnain R., (2022). Study of ammonia removal in aquaponic system with Chinese flowering cabbage (*Brassica chinensis* (var. *parachinensis*)) and mechanical filter for tilapia cultivation.
- Malone, R. F. & Beecher, L. E. (2000). Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems. *Aquacult. Eng.* 22, 57–74.
- Mempel H., Hasan M., Bourouah M., Singh S., Mani I., Kumar L., Paradkar V., Abel M., Wittmann S., Jüttner I., (2022). Development of an automated ion-specific fertigation management system
- Monsees H., Klatt L., Kloas W., Wuertz S., (2016). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems.
- Montero D., Izquierdo M.S., Tort L., Robaina L., M.Vergara J. (1999). High stocking density produces crowding stress altering some physiological and biochemical parameters in gilthead seabream, *Sparus aurata*, juveniles, *Fish Physiology and Biochemistry*, 20: 53–60.
- Nelson, R. L. (2008). Aquaponic equipment: the biofilter. *Aquaponic J*, 48(2), 22-23.
- Noble, A.C. and Summerfelt, S.T. (1996). Disease encountered in rainbow trout cultured in recirculating systems. *Ann. Rev. Fish Dis.* 6: 65 – 92.
- Nozzi V., Parisi G., Crescenzo D., Giordano M., Carnevali O. (2016). Evaluation of *Dicentrarchus labrax* Meats and the Vegetable Quality of *Beta vulgaris* var *cicla* Farmed in Freshwater and Saltwater Aquaponic Systems, *Water* 2016, 8, 423.
- Paudel SR, 2020. Nitrogen transformation in engineered aquaponics with water celery (*Oenanthe javanica*) and koi carp (*Cyprinus carpio*): effects of plant to fish biomass ratio. *Aquaculture* 520:734971.

- Peter Van Wyk (2000). Ammonia Mass Balance Analysis. Harbor Branch Oceanographic Institution
- Pillay, T.V.R. and Kutty, M.N. (2005). *Aquaculture, Principles and Practices, 2nd Edition*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK. 630 p.
- Pinho, S. M., Molinari, D., Mello, G. L., Fitzsimmons, K. M., & Emerenciano, M. G. C. (2017). Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering*, 103, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>
- Putra A.P., Yuliando H., (2015). Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: a Review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, pp. 283-288.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics – Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center, Publication No. 454, 1-16.
- Rakocy, J.E. (2012). *Aquaculture Production Systems: In Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture.*, Chapter 12. Editor James H. Tidwell John Wiley & Sons, Inc. 2012. Pp 421.
- Reyes Yanes A., Martinez P., Ahmad R., (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems.
- Riche, M., & Garling, D. (2003, August). *Feeding Tilapia in Intensive Recirculating Systems*. North Central Regional Aquaculture Center, Fact Sheet Series #114, pp. 14
- Rossi, L., Bibbiani, C., Fierro-Sañudo, J. F., Maibam, C., Incrocci, L., Pardossi, A., & Fronte, B. (2021). Selection of marine fish for integrated multi-trophic aquaponic production in the Mediterranean area using DEXi multi-criteria analysis. *Aquaculture*, 535, 736402.
- Sace., S., Fitzsimmons., K.M. (2013). Vegetable production in a recirculating aquaponic system using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Academia Journal of Agricultural Research*. 1(12): 236-250.
- Salam, M. A., Asadujjaman, M., & Rahman, M. S. (2013). Aquaponics for improving high density fish pond water quality through raft and rack vegetable production. *World Journal of Fish and Marine Sciences*, 5(3), 251-256.

- Sanni, S. and Forsberg, O.I. (1996). Modelling pH and carbon dioxide in single-pass seawater aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 15(2): 91 – 110.
- 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. Rome, FAO. 262 pp. <https://doi.org/10.1002/pssb.201300062>.
- Somma, R. (2008, June 4). Vibrantly Colored Plants. Retrieved April 9, 2010, from Flickr: <http://www.flickr.com/photos/14405058@N08/2551774109/>
- Spotte, S. (1992). Captive seawater fishes: science and technology. John Wiley & Sons.
- Stathopoulou P, Berillis P, Vlahos N, Nikouli E, Kormas KA, Levizou E, Katsoulas N, Mente E. (2021). Freshwater-adapted Sea bass *Dicentrarchus labrax* feeding frequency impact in a lettuce *Lactuca sativa* aquaponics system. PeerJ9: e11522.
- Tacon, A.G.J. (1990). Standard methods for the nutrition and feeding of farmed fish and shrimp. Argent Laboratories Press, Washington DC.
- 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.
- Thomas M. Losordo and Raul H. Piedrahita (1991). Modelling temperature variation and thermal stratification in shallow aquaculture ponds. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- 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.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. & Vinci, B. J. (2001). Recirculating Aquaculture Systems. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY, USA, p. 650.
- Vasdravanidis C., Alvanou M., Lattos A., Papadopoulos D., Chatzigeorgiou I., Ravani M., Liantas G., Georgoulis I., Feidantsis K., Ntinis G., Giantsis I., (2022). Aquaponics as a Promising Strategy to Mitigate Impacts of Climate Change on Rainbow Trout Culture.

- Velten, S., Leventon, J., Jager, N., Newig, J., (2015). What Is Sustainable Agriculture? A Systematic Review, Sustainability, vol. 7, pp. 7833-7865.
- Vlahos N., Hotos G, Kapetanios,N. (2004). The effect of temperature on the conditioning of filter bed in aquaria. 2nd International Congress on Aquaculture, Fisheries Technology and Environmental Management. Athens 18-19 June 2004
- Vlahos, N., Kormas, KA, Pachiadaki, MG., Meziti, A., Hotos G, Mente, E. (2013). Changes in bacterioplankton apparent species richness in two ornamental fish aquaria. SpringerPlus 2, 66. doi:10.1186/2193-1801-2-66.
- Vlahos, N., Akrivouli, A., Mente, E., Exadactylos, A., Nystas, T., Patsea, E., Vidalis, K., Hotos, G., (2016). The effect of three different temperatures on the growth and survival rate of *Palemon adspersus*. Proceeding of the 2nd International Congress on Applied Ichthyology & Aquatic Environment. 10-12 November 2016 Messolonghi – Greece pp:59-63. ISBN 978-618-80242-3-6.
- 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.
- 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, 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.
- Wilson, G. (2010). Aquaponics Network Australia. Retrieved April 10, 2010, from BuildingGreen:
<http://www.buildinggreen.com/auth/image.cfm?imageName=images/1802/raft.jpg&fileName=180201a.xml>.

- Wongkiew S, Popp BN, Kim HJ, Khanal SK, 2017a. Fate of nitrogen in floating-raft aquaponic systems using natural abundance nitrogen isotopic compositions. *Int. Biodeter. Biodegr.* 125:24-32.
- Xiao-Long L., Jin-Jiang Y., Abdessan R., Hong J., (2024). Impact of iron supplementation on media bed aquaponic system: Focusing on growth performance, fatty acid composition and health status of juvenile mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*), production of lettuce (*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort), water quality and nitrogen utilization rate.
- Xiating G., Qi N., Haigeng Z., Jinchen J., Jianjun S., Yanfei X., Yulei Z., (2024). Effects of different stocking density start-up conditions on water nitrogen and phosphorus use efficiency, production, and microbial composition in aquaponics systems
- Zar J. H. *Biostatistical Analysis*; Prentice-Hall: London, UK. (1999); P. 718
- Zou Y, Hu Z, Zhang J, Guimbaud C, Wang Q, Fang Y, 2016b. Effect of seasonal variation on nitrogen transformations in aquaponics of northern China. *Ecol. Eng.* 94:30-6.
- Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Liang S, Wang J, Yan R, 2016a. Attempts to improve nitrogen utilisation efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. *Environ. Sci. Pollut. R.* 23:6671-9.

6.2.Ελληνική Βιβλιογραφία

- Εμμανουήλ Μαλανδράκης. Σύγχρονες τεχνολογίες στις υδατοκαλλιέργειες-καινοτόμες εφαρμογές. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδροβιολογίας Τμήμα Επιστήμης Ζωικής Παραγωγής.
- Θεοδωρακάκη Ελεούσα- Ελένη, (2022). Επίδραση του επιπέδου διατροφής στη φυσιολογική απόκριση της ρόκας (*Eruca sativa*) και του γάστρου (*Lisa saliens*) σε υφάλμυρο πειραματικό σύστημα ενυδρειοπονίας μικρής κλίμακας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Ζωικής Παραγωγής, Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών.
- Καπετάνιος Εμμανουήλ, (2021). Ανάπτυξη λαβρακιού (*Dicentrarchus labrax*) και του φυτού αλμύρας (*Salsola soda*) σε ένα υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος.

- Κουτράκης Ι., (2021). Ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας σε βιολογικά φίλτρα ενυδρειοπονικών συστημάτων υφάλμυρου νερού. Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Ζωικής Παραγωγής, Αλιείας και Υδατοκαλλιερειών. σελ 56.
- Τάσιου Κ. (2019). Παραγωγική διαδικασία του λαβρακιού σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας. Μεταπτυχιακή διπλωματική Διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας σελ 7.