



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΛΙΕΙΑΣ &**  
**ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

**ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**(Πρόγραμμα σπουδών Τεχνολογίας Αλιείας -**  
**Υδατοκαλλιέργειών)**

**«Ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας σε βιολογικά φίλτρα  
ενυδρειοπονικών συστημάτων υφάλμυρου νερού»**

**Ιωάννης Κουτράκης**

**Επιβλέπων: Νικόλαος Βλάχος**

**ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ 2021**

**«Ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας σε βιολογικά φίλτρα  
ενυδρειοπονικών συστημάτων υφάλμυρου νερού»**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :**

- 1) Νικόλαος Βλάχος:** ΕΔΙΠ (Δρ), Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών, Πανεπιστήμιο Πατρών, **Επιβλέπων.**
- 2) Κοσμάς Βιδάλης,** Καθηγητής, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών, Πανεπιστήμιο Πατρών, **Μέλος.**
- 3) Βλασούλα Μπεκιάρη,** Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Επιβλέπων. **Μέλος.**

*Στην οικογένειά μου,*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλαν στο να φέρω εις πέρας την παρούσα Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νικόλαο Βλάχο, ΕΔΙΠ επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης, επεξεργασίας των δεδομένων και συγγραφής της παρούσης διπλωματικής προπτυχιακής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους Βλασούλα Μπεκιάρη και Κοσμά Βιδάλη μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μας προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης και συγγραφή της παρούσης προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής πειραματικής εργασίας ήταν η μελέτη του ρυθμού απομάκρυνσης της αμμωνίας σε ενυδρειοπονικό σύστημα με τρεις διαφορετικές αλατότητες (1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt). Η πειραματική διαδικασία διήρκησε 65 ημέρες.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 3 αυτόνομα συστήματα ενυδρειοπονίας με τη μέθοδο του θρεπτικού υποστρώματος συνολικού όγκου 180 L. Κάθε σύστημα αποτελούνταν από 3 δεξαμενές εκτροφής των ψαριών όγκου 38 L, ένα βιολογικό φίλτρο τύπου sump και μια υδροπονική κυλινδρική υδροπονική δεξαμενή όγκου 0,016 m<sup>3</sup>. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 90 λαβράκια μέσου βάρους  $3.92 \pm 0.83$  gr και μέσου μήκους  $7.62 \pm 0.47$ cm, τα οποία διαμοιράστηκαν ανά 10 άτομα/δεξαμενή εκτροφής/αλατότητα ήτοι (30 άτομα /σύστημα) για διάστημα 45 ημέρες. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 12 άτομα ήμερης ρόκας (*E.sativa*) μέσου ύψους  $10,7 \pm 1,2$  cm , τα οποία διαμοιράστηκαν ανά 4 φυτά στα 3 υδροπονικά συστήματα θρεπτικού υποστρώματος (NFT).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποσοστιαία απορρόφηση των θρεπτικών (ολικής αμμωνίας) από τα φυτά (NRE) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές και στις τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA,  $p > 0,05$ ). Η απομάκρυνση της αμμωνίας (R TAN) στο φίλτρο παρουσίασε στατιστικά μεγαλύτερη τιμή στην μεταχείριση με αλατότητα 7 ppt σε σχέση με τις μεταχειρίσεις 5 ppt και 1,5 ppt (ANOVA,  $p < 0.05$ ). Η παρούσα εργασία αναδεικνύει τη σημαντικότητα συγκαλλιέργειας σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας της ρόκας και του λαβρακιού με ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ανάπτυξη τους στην αλατότητα 1,5ppt.

**Λέξεις κλειδιά:** Ενυδρειοπονία, NFT, Ρυθμός απορρόφησης θρεπτικών, Υδραυλικό φορτίο, Κλειστό σύστημα εκτροφής

## ABSTRACT

The aim of the present study was to investigate the ammonia removal rate in a brackish aquaponic system with three different salinities (1.5 ppt, 5 ppt and 7 ppt). The experimental procedure lasted 65 days.

The experiment was used 3 autonomous aquaponic recirculation systems with a total volume of 180 L and was applied in the hydroponic section nutrient film technique method (NFT). Each system consisted of 3 fish rearing tanks with a volume of 38 L, a sump biological filter and a hydroponic cylinder hydroponic tank with a volume of 0.016 m<sup>3</sup>. A total number of 90 sea bass individuals were used with an average initial weight of  $3.92 \pm 0.83$  gr, and length of  $7.62 \pm 0.47$  cm, which were divided into 10 individuals/tanks (30 individuals/systems) for a rearing period of 45 days. Also, a total number of 12 individuals of rocket plants (*E. sativa*) were used, with an average height of  $10.7 \pm 1.2$  cm, and was divided into 4 plants per hydroponic section (NFT).

The results showed that the nutrient (ammonia) removal efficiency (% NRE) (was the amount of the ammonia uptake of the plants) by the plants did not show statistically significant differences in all three experimental treatments (ANOVA,  $p > 0.05$ ). Ammonia removal rate ( $R_{TAN}$ ) in the filter showed a statistically higher value in 7 ppt salinity treatment compared to 5 ppt and 1.5 ppt treatments, respectively (ANOVA,  $p < 0.05$ ). The present study highlights the importance of co-cultivation in a brackish recirculating system of rocket plant and sea bass with satisfactory results in terms of growth performance at 1.5 ppt salinity.

**Key words:** Aquaponics, Hydraulic Design of NFT aquaponic system, Nutrient removal efficiency, Functional features of the aquaponic system, recirculation system

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	10
1.1 Εισαγωγή στην ενυδραιοπονία .....	10
1.1.1 Η ενυδραιοπονία ως συγκριτική μέθοδος παραγωγής τροφίμων .....	12
1.2 Ενυδραιοπονία σε υφάλμυρο νερό .....	14
1.2.1 Είδη ψαριών και φυτών που χρησιμοποιούνται στην Ενυδραιοπονία .....	14
1.3 Παράμετροι σχεδιασμού συστήματος ενυδραιοπονίας υφάλμυρου νερού .....	15
1.3.1. Καλλιέργεια σε υπόστρωμα .....	15
1.3.2 Μέθοδος συνεχόμενης εισροής -εκροής νερού.....	16
1.3.3 Μέθοδος Θρεπτικού υποστρώματος (NFT).....	17
1.3.4 Μέθοδος επιπλέουσας σχεδίας.....	17
1.4 Ρύθμιση και λειτουργία συστήματος Ενυδραιοπονίας με υφάλμυρο νερό .....	18
1.4.1 Ρύθμιση συστήματος -Βακτήρια.....	18
1.4.2 Λειτουργία συστήματος-λειτουργικά χαρακτηριστικά-υπολογισμοί .....	20
1.5 Θρεπτικά Συστατικά στην Ενυδραιοπονία και ο ρόλος τους στην ανάπτυξη των φυτών .....	24
1.5.1. Ρυθμός Απορρόφησης (απομάκρυνσης) θρεπτικών συστατικών .....	25
1.6 Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	26
<b>2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ</b> .....	27
2.1 Πειραματικός σχεδιασμός- Συνθήκες καλλιέργειας .....	27
2.2 Προμήθεια ιχθύων λαβρακιού και φυτών ρόκας .....	31
2.3 Έναρξη λειτουργίας και ρύθμιση συστημάτων ενυδραιοπονίας.....	31
2.4 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος ενυδραιοπονίας.....	32
2.5 Διαχείριση πειραματικών συστημάτων.....	33
2.6 Έλεγχος ποιότητας νερού.....	33
2.7 Δείκτες υπολογισμού λειτουργικών παραμέτρων συστήματος ενυδραιοπονίας και απορρόφησης .....	37



2.8 Στατιστική Ανάλυση .....	39
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>40</b>
3.1 Ποιότητα νερού .....	40
3.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά NFT .....	47
3.3 Απομάκρυνση θρεπτικών -Απόδοση Συστήματος NFT .....	50
<b>4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>52</b>
4.1 Ποιότητα νερού .....	52
4.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά .....	53
4.3 Ρυθμός απομάκρυνσης θρεπτικών .....	54
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>55</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>56</b>
6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία .....	56
6.2 Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία .....	58

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγή στην ενυδραιοπονία

Η ενυδραιοπονία είναι οικολογική μέθοδος παραγωγής τροφίμων που τεχνικά συνδυάζει τη συμβατική υδατοκαλλιέργεια (εκτροφή υδρόβιων ζώων όπως ψάρια, καρκινοειδή, μαλάκια σε δεξαμενές) και την υδροπονία (καλλιέργεια φυτών σε νερό χωρίς χώμα) σε ένα σύστημα με ανακυκλούμενο νερό (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) όπου χρησιμοποιεί τα μεταβολικά προϊόντα των ψαριών (απόβλητα) για τη θρέψη των φυτών (Somerville et al. 2014).

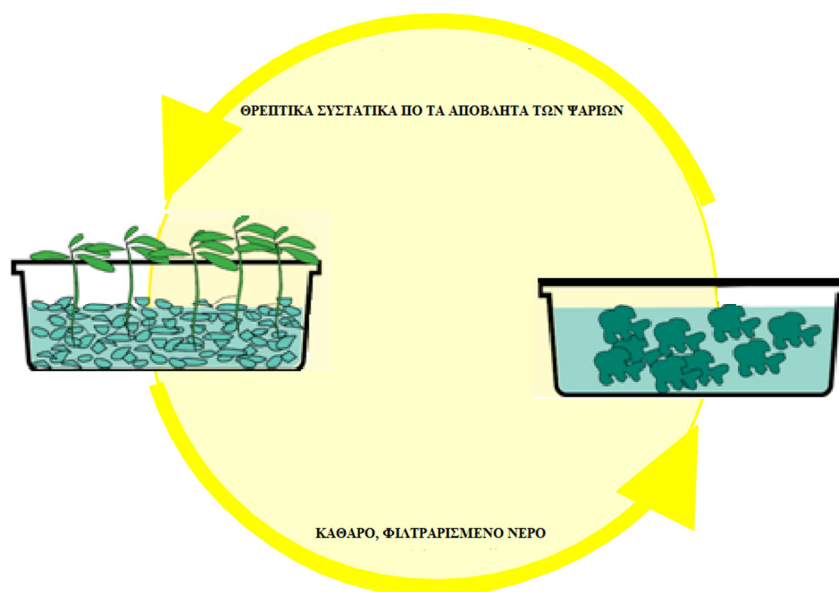
Η ενυδραιοπονία αξιοποιεί τις βέλτιστες ιδιότητες της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, χωρίς να χρησιμοποιεί χημικά λιπάσματα ή να απορρίπτει μεγάλο όγκο νερού στο φυσικό περιβάλλον και χαρακτηρίζεται ως μέθοδο παραγωγής οργανικών τροφίμων. Προωθεί ένα πρωτοποριακό σύστημα παραγωγής τροφίμων που αποσκοπεί στον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων (μειώνει τις περιβαλλοντικές φορτίσεις της ιχθυοκαλλιέργειας), στη έλεγχο της μείωσης-εξάντλησης των αποθεμάτων πόσιμου νερού, στη αύξηση της γονιμότητας των εδαφών και στη βιοποικιλότητα.

Η ενυδραιοπονία επιλύει τα βασικά ζητήματα που αντιμετωπίζει η υδατοκαλλιέργεια και η υδροπονία και εστιάζει στην αναζήτηση βιώσιμων μεθόδων φιλτραρίσματος στην απόρριψη αποβλήτων από τα ψάρια τα οποία είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά και μέταλλα τα οποία απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών (Nelson 2008). Ο συνδυασμός των συστημάτων αυτών, παρέχει μία φυσική πηγή θρεπτικών ουσιών για την επιβίωση και ανάπτυξη των φυτών, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει το φορτίο ρύπανσης που δημιουργείται από τα απόβλητα προϊόντα τα οποία συχνά απορρίπτεται ως λύματα.

Τα μεταβολικά προϊόντα των ψαριών (αμμωνία) εκκρίνονται διαμέσων των βραγχίων και των στο νερό της εκτροφής. Με την πάροδο του χρόνου, οι τοξικές ενώσεις της αμμωνίας συσσωρεύονται στο νερό, θέτοντας σε κίνδυνο την ευζωία των ψαριών, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οργανικό λίπασμα για τα φυτά (Nelson 2008). Τα θρεπτικά συστατικά, σε μεγάλο βαθμό με την μορφή αμμωνίας οξειδώνονται διαμέσων της βιοχημικής διεργασίας της νιτροποίησης σε νιτρικά ιόντα και της αναγωγικής διεργασίας της απονιτροποίησης σε άζωτο. Στις διεργασίες αυτές συμμετέχουν νιτροποιητικά και απονιτροποιητικά βακτήρια που αναπτύσσονται στην

υδροπονική κλίνη, σε μορφές που προσλαμβάνονται ευχερώς από τα φυτά για ενέργεια και ανάπτυξη.

Ουσιαστικά, η υδροπονική κλίνη χρησιμεύει ως βιολογικό φίλτρο συμβάλλοντας σε μικρό σχετικά ποσοστό στην επεξεργασία των αποβλήτων των ψαριών, τα οποία επιστρέφουν στη δεξαμενή εκτροφής των ψαριών. Ο Diver (2006) αναφέρει ότι τα απόβλητα ενός βιολογικού συστήματος (δεξαμενές εκτροφής) γίνονται θρεπτικά για ένα άλλο βιολογικό σύστημα (υδροπονικές δεξαμενές καλλιέργειας φυτών) (Εικ.1).



Εικόνα 1. Ροή ανακύκλωσης των θρεπτικών συστατικών στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Πηγή: Connolly & Trebic 2010 (όπως τροποποιήθηκε από Suits (2010)).

Η ενυδρειοπονία επιτρέπει τη χρησιμοποίηση ενός κατάλληλου σιτηρεσίου ώστε να καλύπτει τις θρεπτικές απαιτήσεις των ψαριών και των φυτών. Το σιτηρέσιο θα πρέπει να περιέχει, κατάλληλη περιεκτικότητα ζωικής πρωτεΐνης (ιχθυάλευρα), φυτικές ίνες, μέταλλα ιχνοστοιχεία, λιπίδια και υδατάνθρακες). Η διαδικασία, πραγματοποιείται, χωρίς να διαταράσσεται η ισορροπία του συστήματος και να μειώνεται σημαντικά ο όγκος νερού που εισέρχεται στο σύστημα (Nelson 2008) ή να αυξάνεται η θρεπτική αξία νερού που αποκτάται από το συνεχώς επεξεργασμένο και ανακυκλούμενο νερό (Considine 2007).

Όταν το σύστημα ισορροπεί και η πυκνότητα εκτροφής είναι ικανοποιητική, επιτυγχάνεται μεγάλη παραγωγή ψαριών και φυτών η οποία είναι ανεξάρτητη από την περίοδο ξηρασίας, ή τις άνυδρες εποχές (Nelson 2008). Η παροχή τροφής είναι

συνεχόμενη καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου εκτροφής αποτελώντας το κλειδί για την ανάπτυξη των βακτηρίων (Hughey 2005). Η έλλειψη χρήσης εδάφους στην ενυδραιοπονία, ερμηνεύεται ότι η ενυδραιοπονία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αστικές περιοχές και σε περιοχές με φτωχή ποιότητα εδάφους (Nelson 2008).

Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τροφή (ψάρια) και τα προβλήματα επισιτισμού του συνεχόμενα αυξανόμενου πληθυσμού παγκοσμίως, υπάρχει η αναγκαιότητα εγκαθίδρυσης βιώσιμων παραγωγικών συστημάτων για την παραγωγή τροφίμων (Nelson 2008) και κάλυψη των αναγκών με μειωμένο κόστος (Diver 2000). Η ενυδραιοπονία καλύπτει τις προϋποθέσεις αυτές δίνοντας μια απάντηση στην αύξηση της αποδοτικότητας των πόρων παρέχοντας ταυτόχρονα σε οικογένειες ή μεμονωμένα άτομα μεγαλύτερο έλεγχο της ποιότητας, της ασφάλειας και προέλευσης των τροφίμων.

### **1.1.1 Η ενυδραιοπονία ως συγκριτική μέθοδος παραγωγής τροφίμων**

Η παραγωγή τροφίμων μέσω της ενυδραιοπονίας χαρακτηρίζεται ως μια ευέλικτη τεχνική διαδικασία καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εμπορική κλίμακα ή σε επίπεδο παραγωγής οικιακών τροφίμων. Συνδυάζει πολλά από τα πλεονεκτήματα άλλων μεθόδων παραγωγής τροφίμων, όπως η υδατοκαλλιέργεια και η υδροπονία με τα οποία είναι μοναδικά για την υδροπονία. Οι μεγάλες ποσότητες διαλυμάτων (ανάμειξη θρεπτικών αλάτων) χρησιμοποιούνται στην υδροπονία προκειμένου να καλυφθούν οι διατροφικές απαιτήσεις των φυτών στην ενυδραιοπονία μειώνονται σημαντικά (Nelson 2008). Στην ενυδραιοπονία δεν απαιτείται η προσθήκη συνθετικών χημικών λιπασμάτων διότι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά τα απόβλητα των ψαριών, τα οποία περιέχουν επαρκείς ποσότητες των απαραίτητων χημικών στοιχείων όπως της αμμωνίας, των νιτρικών ιόντων, των νιτρωδών ιόντων, του φωσφόρου, του καλίου και μικροθρεπτικών συστατικών, απαραίτητα για την υγιή ανάπτυξη των φυτών (Diver 2006). Η ενυδραιοπονία συγκαταλέγεται στις τεχνικές που συνδυάζουν την οργανική μέθοδο υδροπονίας (Nelson 2008) της οποίας η μόνη πηγή λίπανσης αποτελεί η τροφή των ψαριών που περιέχει 32% -50% πρωτεΐνη (Spade 2009) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αζωτούχων προϊόντων. Σε σύγκριση με την υδατοκαλλιέργεια, ένα ενυδραιοπονικό σύστημα μπορεί να φιλοξενήσει ψάρια με υψηλή πυκνότητα εκτροφής, υπό την προϋπόθεση ότι το νερό φιλτράρεται και να διέρχεται από τα τρία

στάδια (μηχανικά, βιολογικά) και ο αερισμός καλύπτει τις απαιτήσεις των ψαριών σε οξυγόνο.

Πίνακας 1: Σύγκριση διαφόρων μορφών παραγωγής τροφίμων (όπως τροποποιήθηκε από Nelson (2008)).

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Βιολογική καλλιέργεια	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Θεωρείται ότι είναι μια πιο υγιεινή μέθοδος καλλιέργειας τροφίμων από την εμπορική γεωργία και έτσι έχει γίνει δημοφιλής.</li> <li>* Χρησιμοποιεί οργανικά απόβλητα ως λίπασμα.</li> <li>* Χρησιμοποιεί φυσικό έλεγχο παρασίτων.</li> <li>* Τείνει να παράγει καλύτερη γεύση στα προϊόντα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Απαιτεί περισσότερη γη από τη συμβατική γεωργία.</li> <li>* Υψηλότερο κόστος για την καλλιέργεια και την πιστοποίηση των καλλιεργειών.</li> <li>* Η αγροτική επιχείρηση αντικαθιστά γρήγορα οργανικές εργασίες μικρής κλίμακας.</li> </ul>
Υδροπονική καλλιέργεια	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Οι ποσότητες τροφίμων παράγονται σε περιορισμένο χώρο.</li> <li>* Υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ετησίως εάν ελεγχθεί.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δαπανηρά λιπάσματα που παρασκευάζονται /εξορύσσονται.</li> </ul>
Ανακυκλούμενα συστήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Αυξημένη βιομάζα ψαριών που παράγονται σε μικρό σχετικά χώρο.</li> <li>* Υψηλό ποσοστό αστοχίας λόγω μικρού περιθωρίου σφάλματος.</li> <li>* Παράγεται μεγάλη ροή αποβλήτων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Υψηλό ποσοστό αστοχίας λόγω μικρού περιθωρίου σφάλματος.</li> <li>* Παράγεται μεγάλη ροή αποβλήτων.</li> </ul>
Ενυδρειοπονία	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Όλα τα πλεονεκτήματα των άλλων μεθόδων και επιπλέον:</li> <li>* Επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων των ψαριών ως θρεπτικά συστατικά για τα φυτά.</li> <li>* Τα ψάρια δεν φέρουν παθογόνους μικροοργανισμούς, πχ E.coli και σαλμονέλα που βρίσκονται σε θερμόαιμα ζώα.</li> <li>* Μιμείται ένα φυσικό κύκλο και είναι πιο βιώσιμος από τις προηγούμενες μεθόδους</li> <li>* Κατάλληλη βιομάζα ψαριών ώστε να καλύπτει την ανάπτυξη των φυτών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Απαιτείται γνώση για την παραγωγή ψαριών και φυτών.</li> <li>* Οι σημαντικές διακυμάνσεις των αποθεμάτων των ψαριών στη δεξαμενή μπορούν να διαταράξουν την ανάπτυξη των φυτών.</li> </ul>

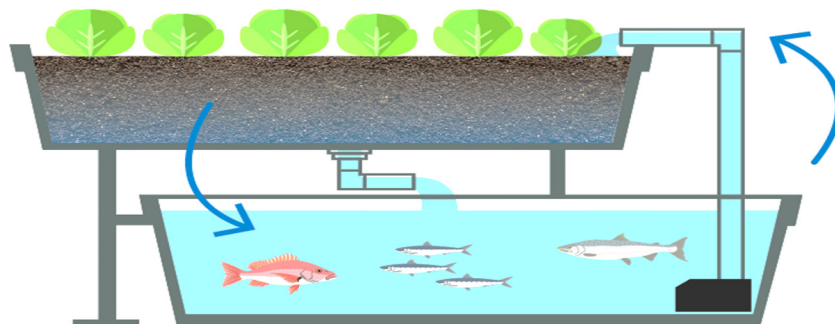
## 1.2 Ενυδρειοπονία σε υφάλμυρο νερό

### 1.2.1 Είδη ψαριών και φυτών που χρησιμοποιούνται στην Ενυδρειοπονία

Τα είδη των ψαριών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία εξαρτώνται από τις διατροφικές συνήθειες του ψαριού, τη θερμοκρασία, το pH, τα διαλυμένα στερεά και εν γένει τις εκάστοτε συνθήκες εκτροφής (Diver 2006, Nelson 2008).

Υπάρχει ένας αριθμός ψαριών γλυκού νερού, τόσο του ζεστού όσο και του κρύου νερού που προσαρμόζονται και καλλιεργούνται σε συστήματα ανακύκλωσης. Σε αυτά συγκαταλέγονται η τιλάπια, η πέστροφα, η πέρκα (Diver 2006), το λαβράκι, το γατόψαρο, ο κυπρίνος, το κόι, το χρυσόψαρο, barramundi, το είδος *Scortum barcoo* και διάφορα είδη διακοσμητικών ψαριών κρύου γλυκού και θερμών νερών (Nelson 2008).

Πολλοί τύποι φυτών μπορούν να αναπτυχθούν επιτυχώς σε συστήματα ενυδρειοπονίας, ενώ σύμφωνα με τον Nelson (2008) έχουν καλλιεργηθεί περισσότερα από 60 είδη με τα φυλλώδη πράσινα λαχανικά, βότανα και ορισμένα καρποφόρα είδη να καλλιεργούνται αποτελεσματικά (Εικ. 2).



Εικόνα 2: Απεικόνιση ενυδρειοπονικού συστήματος με μαρούλι (Πηγή: Connolly & Trebic 2010)

Η επιλογή του φυτού θα πρέπει να γίνεται με κριτήριο το κέρδος, όπως συμβαίνει με τα συστήματα εμπορικής κλίμακας. Αυτά περιλαμβάνουν βότανα όπως βασιλικό, σχοινόπρασο, κόλιανδρο και μαιντανό των οποίων οι χρόνοι συγκομιδής κυμαίνονται μεταξύ 25 και 40 ημερών. Το μαρούλι είναι η πιο καλή καλλιέργεια λόγω του τόσο μικρού χρόνου συγκομιδής (3-4 εβδομάδες) όσο και της υψηλής ζήτησης επειδή ένα μεγάλο μέρος της τελικής μάζας του συγκομίζεται εύκολα και είναι βρώσιμο, καθώς και πολύ προσοδοφόρο. Επίσης, η έλλειψη ενός καρποφόρου σταδίου διατηρεί τις απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια πιο

αξιόπιστη συγκομιδή. Τέλος άλλα φυλλώδη πράσινα λαχανικά (Εικ.3) αυτής της κατηγορίας είναι το παντζάρι, το κινέζικο λάχανο (pak choi), οι λαχανίδες και το κάρδαμο, τα οποία πέρα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, αντιμετωπίζουν λιγότερα προβλήματα παρασίτων σε σύγκριση με τα καρποφόρα φυτά (Rakocy 1989).



Εικόνα 3: Φυλλώδη λαχανικά και εκτεταμένο ριζικό σύστημα σε ενδραιοπονικό (Πηγή: Somma 2008, Wilson 2010).

### **1.3 Παράμετροι σχεδιασμού συστήματος ενδραιοπονίας υφάλμυρου νερού**

Υπάρχουν διάφορα τύποι συστημάτων που στηρίζονται στην ανακύκλωση του νερού και εφαρμόζονται στην ενδραιοπονία. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται βασίζονται στα υδροπονικά συστήματα και η διαφορά εστιάζεται στην παροχή του νερού η οποία προέρχεται από τη δεξαμενή εκτροφής των ψαριών και επιστρέφει στη πηγή προέλευσης του.

#### **1.3.1. Καλλιέργεια σε υπόστρωμα**

Στην υδροπονία σημαντικό ρόλο παίζει το μέσο στο οποίο επιτελείται η καλλιέργεια των φυτών όπως για παράδειγμα το υπόστρωμα καλλιέργεια, μιας και η παρουσία ενός υποστρώματος χρησιμοποιείται για να αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών (Εικ.4). Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η μέθοδος αυτή εξαλείφει την ανάγκη λειτουργίας μηχανικού και βιολογικού φίλτρου (Lennard 2021). Τα απόβλητα με μορφή λάσπης παγιδεύονται από το διάκενο που δημιουργεί το κοκκώδες υπόστρωμα με αποτέλεσμα τα βακτήρια να βρίσκονται σε αφθονία και να ενεργούν ως βιολογικό φίλτρο. Εάν στο σύστημα δεν χρησιμοποιείται υπόστρωμα, οι ρίζες των φυτών εκτίθενται στο νερό, οπότε κρίνεται αναγκαία η χρησιμοποίηση μηχανικού

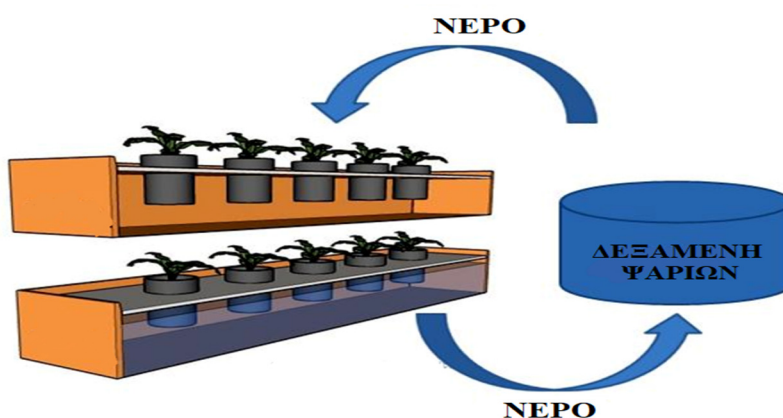
φίλτρου ή δεξαμενής καθίζησης και βιολογικό φίλτρο ώστε να ισορροπηθεί η ποιότητα του νερού σε ικανοποιητικά επίπεδα στα οποία μπορούν να διαβιούν και να αναπτύσσονται τα ψάρια.



Εικόνα 4. Κοκκώδες υπόστρωμα τύπου Leica (άργιλος) ανάπτυξης φυτών (Πηγή: Smith 2006).

### 1.3.2 Μέθοδος συνεχόμενης εισροής -εκροής νερού

Η μέθοδος συνεχόμενης εισροής (flood-πλημύρα) και εκροής νερού (drain-αποστράγγιση) στην υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας φυτών μέσω σιφωνίου πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και δεν προϋποθέτει την παρουσία φίλτρων, εξαιτίας του ρόλου που επιτελούν τα υλικά πλήρωσης (π.χ., ελαφρόπετρα ή άργιλος τύπου Leca, ή λάβα) και συμβάλλουν μερικώς στην βιοχημική διεργασία του νερού (Zou et al. 2016b). Ένα σιφώνιο (ποτήρι Αρχιμήδη) χρησιμοποιείται για την συνεχόμενη πλήρωση και αποστράγγιση του νερού, ώστε οι ρίζες των φυτών να αερίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (Bernstein 2011). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η μείωση του διάκενου των υλικών πλήρωσης μετά από μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 5: Υδροπονικές δεξαμενές συνεχόμενης εισροής και εκροής νερού (σύστημα που πλημμυρίζει και αποστραγγίζει το νερό) (Πηγή: Dave 2010).



### 1.3.3 Μέθοδος Θρεπτικού υποστρώματος (NFT)

Η μέθοδος θρεπτικού υποστρώματος συνίσταται στο ότι οι ρίζες των φυτών εκτίθενται σε ένα λεπτό στρώμα νερού που περιέχει θρεπτικά και διέρχεται συνεχόμενα μέσω ενός σωλήνα PVC. Η ιδέα είναι ότι η μικρή και χαμηλή ροή του νερού δημιουργεί στον πυθμένα ένα παχύ στρώμα στο οποίο οι ρίζες εφάπτονται στον πυθμένα του σωλήνα ενώ το υπόλοιπο μέρος της ρίζας βρίσκεται στον αέρα λαμβάνοντας με τον τρόπο αυτόν επαρκή συγκέντρωση οξυγόνου (Εικ.6). Η κλίση του σωλήνα, το μήκος και η ταχύτητα ροής θα πρέπει να υπολογίζονται για να διασφαλιστεί ότι τα φυτά λαμβάνουν την απαιτούμενη ποσότητα νερού, οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά. Το NFT εάν κατασκευαστεί σωστά μπορεί να διατηρήσει πολύ μεγάλη πυκνότητα φυτών. Σ' ένα συστήματα NFT, το βιολογικό φίλτρο είναι αναγκαίο καθώς δεν υπάρχει μεγάλη επιφάνεια όπου μπορούν να αναπτυχθούν τα βακτήρια (Nelson 2008).



Εικόνα 6: Σύστημα θρεπτικού υποστρώματος NFT (Πηγή: Nelson 2008)

### 1.3.4 Μέθοδος επιπλέουσας σχεδίας

Στη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας (raft μέθοδος) τα φυτά καλλιεργούνται σε πλωτές σχεδίες που δημιουργούνται από ένα υλικό συμπαγές και ανθεκτικό αφρώδες πολυστυρένιο εξωθημένου κλειστού κελιού. στις σχεδίες διανοίγονται μικρές τρύπες όπου τα φυτά τοποθετούνται σε ειδικά φυτοδοχεία (netpots), ενώ οι ρίζες αιωρούνται ελεύθερες στο νερό ώστε να μπορούν να προσλαμβάνουν τα θρεπτικά συστατικά (Εικ.7).

Μία ειδοποιός διαφορά μεταξύ των μεθόδων της επιπλέουσας σχεδίας, της NFT μεθόδου θρεπτικού υποστρώματος και των της συνεχόμενης εισροής και εκροής νερού, αποτελεί η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται. Η στάθμη του νερού κάτω από τις πλωτές σχεδίες έχει βάθος από 25 έως 40 cm με αποτέλεσμα ο όγκος του νερού να είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερος σε σχέση με άλλα συστήματα. Ο μεγαλύτερος όγκος νερού οδηγεί σε χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερη παροχή νερού. Τα βακτήρια αναπτύσσονται στη κάτω επιφάνεια των σχεδίων επίπλευσης, αλλά γενικά απαιτείται ξεχωριστό βιολογικό φίλτρο. Οι ρίζες των φυτών εκτίθενται σε επιβλαβείς οργανισμούς που βρίσκονται στο νερό, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών.



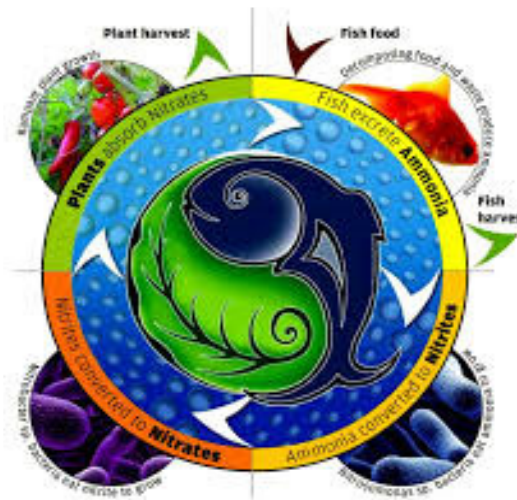
Εικόνα 7. Σύστημα πλωτής σχεδίας (Πηγή: [www.thespruce.com/hydroponic-gardens-the-lettuce-raft-method](http://www.thespruce.com/hydroponic-gardens-the-lettuce-raft-method)).

## **1.4 Ρύθμιση και λειτουργία συστήματος Ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό**

### **1.4.1 Ρύθμιση συστήματος -Βακτήρια**

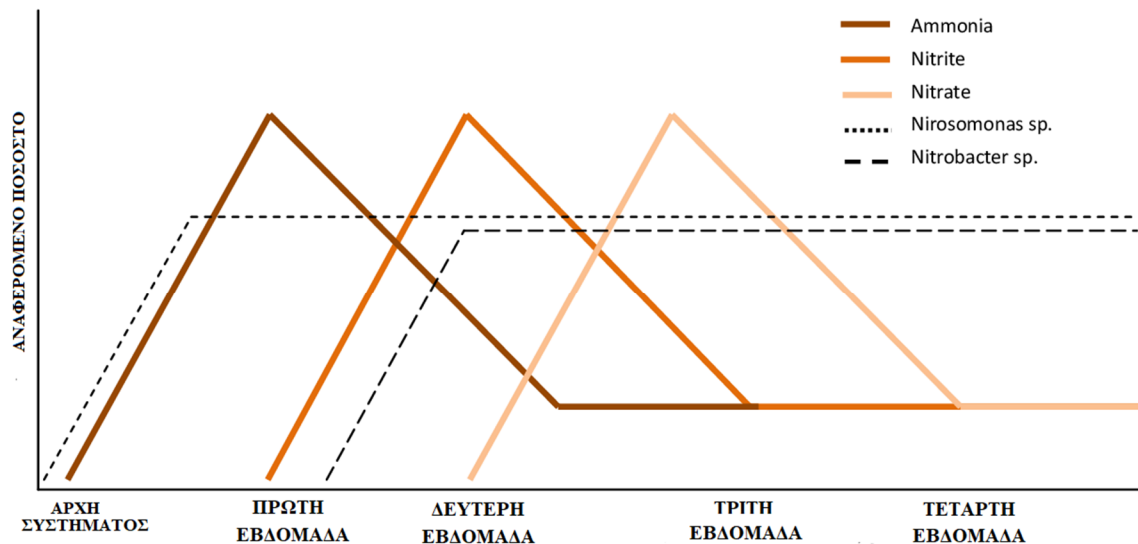
Τα αυτότροφα βακτήρια είναι ζωτικής σημασίας διότι μετατρέπουν τα απόβλητα των ψαριών σε θρεπτικά συστατικά τα οποία προσλαμβάνονται από τα φυτά. Πρέπει να διατηρηθούν οι κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες για να εξασφαλιστεί η άφθονη ανάπτυξη βακτηριακών πληθυσμών στο βιολογικό φίλτρο (Εικ.8). Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου όπου σε συνδυασμό με τις ρίζες των φυτών πραγματοποιούν όλες τις απαραίτητες μετατροπές στα θρεπτικά συστατικά τα οποία

χρησιμοποιούνται για την σίτιση των φυτών αλλά και για τη διήθηση των αποβλήτων των ψαριών.



Εικόνα 8: Κύκλος του αζώτου στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Steave 2007).

Τα απόβλητα των ψαριών περιέχουν ολική αμμωνία ( $\text{NH}_3$  &  $\text{NH}_4^+$ ) που εκκρίνονται μέσω των ούρων και των βραγχίων των ψαριών και σχηματίζονται από την αποσύνθεση οργανικών στερεών, όπως τα απορρίμματα ψαριών και από την περίσσεια τροφής. Νιτροποιητικά βακτήρια όπως τα *Nitrosomonas sp.* μετατρέπουν την τοξική αμμωνία χρησιμοποιώντας την ως πηγή ενέργειας σε νιτρώδη ιόντα ( $\text{NO}_2^-$ ), η οποία είναι τοξική για τα ψάρια), χρησιμοποιώντας οξυγόνο σε μια διαδικασία οξειδωσης. Τέλος, τα νιτρώδη ιόντα οξειδώνονται άμεσα από τα *Nitrobacter sp.* Για να σχηματίσουν νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ), η προτιμώμενη μορφή αζώτου κατάλληλη για τα φυτά (Losordo et al. 1998). Όταν τα ψάρια εισάγονται σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα, τα επίπεδα αμμωνίας στο νερό αυξάνονται τη πρώτη εβδομάδα, μετά αρχίζουν να μειώνονται ενώ τα επίπεδα των νιτρικών αυξάνονται. Σε τέσσερις εβδομάδες ή στο διάστημα μεταξύ 20 και 30 ημερών, οι ενώσεις αζώτου σταθεροποιούνται σχετικά στη συγκέντρωση (Εικ.9). Τα νιτροποιητικά βακτήρια χρειάζονται οξυγόνο για τις μεταβολικές διεργασίες τους, επομένως το υλικό πλήρωσης θα πρέπει να είναι πορώδες και να αερίζονται καλά (Εικ.9). Απαιτούν ένα ορισμένο εύρος pH, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 7 έως 8 (Nelson 2008), όπου η απόδοση των βακτηρίων στην οξείδωση ανεπιθύμητων ενώσεων αρχίζει να μειώνεται κάτω από pH 6,8 και τέλος, η βέλτιστη μετατροπή τοξικών σε μη τοξικές ενώσεων παρατηρείται στους 25°C (Nelson 2008).



Εικόνα 9: Διάγραμμα αποτύπωσης της μεταβολής του κύκλου αζώτου που προκύπτει από την προσθήκη ψαριών σε μία δεξαμενής ενυδρείοπονίας (Nelson 2008)

#### 1.4.2 Λειτουργία συστήματος-λειτουργικά χαρακτηριστικά-υπολογισμοί

##### *Αναλογίες συστατικών*

Η παροχή της τροφής είναι ο κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος και έχει εξαχθεί σύμφωνα με την απόδοση στα συστήματα ενυδρείοπονίας το οποίο αντιστοιχεί σε μια αναλογία 25g τροφής / m<sup>2</sup>/d, το οποίο αντιστοιχεί σε συντελεστή μετατρεψιμότητας FCR 1,7 και απόδοση 60 kg/ m<sup>3</sup>.

##### *Αναλογία ποσοστών σίτισης και ετήσια μάζα ιχθυοτροφών*

Χρησιμοποιείται ανάλογος ρυθμός τροφοδοσίας 25g τροφή/ m<sup>2</sup> εμβαδού υδροπονικής δεξαμενής καλλιέργειας των φυτών ανά ημέρα. Το σύστημα UVI χρησιμοποιεί την αναλογία 100 g/ m<sup>2</sup> /d για ένα σύστημα ενυδρείοπονίας που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της πλωτής σχεδίας, το οποίο περιέχει τέσσερις φορές την ποσότητα νερού. Διαμέσου της αναλογίας αυτής υπολογίστηκε η ετήσια ποσότητα ιχθυοτροφών που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα.

$$\text{Ετήσιο βάρος τροφής} = \frac{25\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} * \frac{365\text{d}}{\text{Έτος}} * \frac{6\text{m}^2}{\text{Καλλιέργεια}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 54,75 \text{ kg/Έτος}$$

### ***Αναλογία τροφής (FCR)***

Ο συντελεστής μετατρεψιμότητας της τροφής είναι 1,7 (FCR), και εκφράζει ότι για κάθε κιλό επιθυμητής ανάπτυξης βιομάζας ψαριών απαιτούνται 1,7 kg τροφής.

### ***Παραγωγή βιομάζας ψαριών***

Χρησιμοποιώντας την αποδοτικότητα του ρυθμού παροχής της τροφής και την ποσότητα των ιχθυοτροφών που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα, η καθαρή παραγωγή βιομάζας του συστήματος υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική σχέση :

$$\text{Ετήσια βιομάζα παραγωγής} = \frac{54,75 \text{ kg τροφή}}{\text{yr}} * \frac{0,59 \text{ kg βιομάζα}}{\text{kg τροφή}} = 32,3 \text{ kg βιομάζας}$$

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται το καθαρό κέρδος της βιομάζας των ιχθύων Τέλος, για να υπολογιστεί ο αριθμός των ψαριών που το σύστημα θα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για εκτροφή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιούμε το καθαρό κέρδος βιομάζας του κάθε ψαριού. Τα ιχθύδια που θα εισαχθούν στο σύστημα για προ πάχυνση με μέσο βάρος 20g και θα συλλεχθούν στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας 450g, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει καθαρή αύξηση βάρους 0,40 kg/ ψάρι.

$$\text{Αριθμός ιχθύων ανά έτος} = \frac{32,3 \text{ kg Βιομάζας}}{0,430 \text{ kg Βιομάζας/ Ψάρι}} = 75,1 = 76 \text{ Ψάρια}$$

### ***Εκτροφή και συγκομιδή ψαριών***

Η πυκνότητα εκτροφής σε μια δεξαμενή ψαριών εκφράζεται ως βιομάζα ως τον συνολική βιομάζα ιχθύων ανά όγκο νερού εκτροφής (kg/m<sup>3</sup>). Η πυκνότητα εκτροφής παίζει ουσιαστικό ρόλο και συνυπολογίζεται στους παραμέτρους που επηρεάζουν μεταβάλλοντας τις συνθήκες εκτροφής και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού εκτροφής. Προκαλεί αύξηση της παραγωγής αποβλήτων στην δεξαμενή εκτροφής με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα επίπεδα της αμμωνίας και των νιτρικών ιόντων και να μειώνεται το οξυγόνο εξαιτίας της αυξημένης κατανάλωσης σε οξυγόνο.

### ***Κρίσιμη και σταθερή καλλιέργεια***

Η σταθερή καλλιέργεια είναι η μέγιστη βιομάζα ψαριών που ένα σύστημα μπορεί να υποστηρίξει χωρίς να περιορίσει την ανάπτυξη των ψαριών. Η λειτουργία

του συστήματος που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά το χώρο εκτροφής, μεγιστοποιεί την παραγωγική διαδικασία και μειώνει τη διακύμανση της ημερήσιας παροχής τροφής στο σύστημα, ο οποίος είναι ένας σημαντικός παράγοντας επηρεάζοντας το μέγεθος της καλλιεργητικής περιοχής (Rakocy et al. 2006).

### *Συλλογή ψαριών – Πολλαπλές δεξαμενές εκτροφής*

Για να διατηρηθεί η πυκνότητα εκτροφής στο σύστημα, χρησιμοποιείται η μέθοδος της εκτροφής σε πολλαπλές δεξαμενές (Πιν.1 και Πιν.2). Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές ομάδες ψαριών και όπως προαναφέρθηκε πιο πάνω θα εισέλθουν στο σύστημα ψάρια μεγέθους 20g ενώ το τελικό βάρος θα είναι στα 450g σε 170 ημέρες. Κάθε έξι εβδομάδες το μεγαλύτερο κοπάδι θα συλλέγεται και το μικρότερο θα επανατοποθετείται στις δεξαμενές για περαιτέρω ανάπτυξη. Ο αριθμός των ψαριών ανά συγκομιδή υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο (Πιν.2):

$$\begin{aligned} \text{Αριθμός ιχθύων ανά συγκομιδή} &= \frac{76 \text{ Ψάρια}}{\text{Έτος}} * \frac{6 \text{ Εβδομάδες}}{\text{Συγκομιδή}} * \frac{1 \text{ Έτος}}{52 \text{ Εβδομάδες}} \\ &= 8.77 = 9 \text{ Ψάρια/Συγκομιδή} \end{aligned}$$

Πίνακας 2.Χαρακτηριστικά δεδομένα εκτροφής ανά ομάδα εκτροφής στο τέλος κάθε περιόδου εκτροφής (έξι εβδομάδες) καθώς και ο όγκος του νερού που απαιτείται ανά πυκνότητα εκτροφής.

Ομάδα	Τελική βιομάζα/ψάρι (kg)	Συνολική βιομάζα (kg)	Πυκνότητα	Όγκος νερού (L)
1	0,07	0,63	0,06	10,5
2	0,170	1,53	0,06	25,5
3	0,300	2,70	0,06	45,0
4	0,450	4,05	0,06	67,5
			Συνολικός όγκος δεξαμενής	148,5

Πίνακας 3. Αρχικό βάρος ψαριού ανά ομάδα εκτροφής με την έναρξη του κάθε κύκλου έξι εβδομάδων.

Ομάδα	Αρχικό Βάρος/Ψάρι (g)	Καθαρό Βάρος (kg)	Όγκος Νερού (L)	Πυκνότητα (kg/L)
1	20	0,18	10,5	0,017143
2	70	0,63	25,5	0,014706
3	170	1,53	45	0,034
4	300	2,7	67,5	0,04
Σύνολο		5,04	148,5	0,033939

#### ***Ρυθμός ροής νερού***

Ο ρυθμός ροής του νερού πρέπει να εξασφαλίζει καλή ποιότητα νερού. Το νερό διοχετεύεται μέσω του υδροπονικού μέσου καλλιέργειας αρκετές φορές την ημέρα για να φιλτράρεται επαρκώς και επομένως να διασφαλίζεται η απομάκρυνση των αποβλήτων ενώσεων που είναι τοξικές για τα ψάρια. Σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα ο ρυθμός ροής του νερού ( $Q_w$ ) πρέπει να είναι κατάλληλος ώστε ο όγκος του νερού εκτροφής να διέρχεται από το βιολογικό φίλτρο δύο φορές την ώρα.

#### ***Υδραυλικός ρυθμός φόρτωσης (Υδραυλικό φορτίο)***

Το υδραυλικό φορτίο καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο τα απόβλητα των ψαριών εισέρχονται στην υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας των φυτών. Παρόλο που οι ρυθμοί υδραυλικής φόρτωσης έχουν αποδειχθεί ότι δεν έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση της παραγωγής ψαριών, στους ειδικούς ρυθμούς ανάπτυξης των ψαριών ή στην αποτελεσματικότητα με την οποία τα ψάρια χρησιμοποιούν τρόφιμα για την ανάπτυξη της βιομάζας. Οι Endut et al. (2010) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται σημαντικά από τον ρυθμό με τον οποίο παρέχεται το νερό στην υδροπονική δεξαμενή ανάπτυξης των φυτών. Το υδραυλικό φορτίο μειώνει το χρόνο επαφής μεταξύ των βακτηρίων και των θρεπτικών συστατικών στο φίλτρο. Επομένως, η ανάπτυξη των φυτών μειώνεται σημαντικά με υψηλές τιμές HLR. Το υδραυλικό φορτίο ενός συστήματος υπολογίζεται διαιρώντας την παροχή του νερού,  $Q_w$  με την

επιφάνεια του φίλτρου. Για παροχή νερού 0,3 m<sup>3</sup>/ώρα και η επιφάνεια φίλτρου 6 m<sup>2</sup> το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Υδραυλικό φορτίο} = \frac{Q_w}{A_{\text{Συγκομιδή}}} = \frac{0,3 \text{ m}^3/\text{hr}}{6 \text{ m}^2} * \frac{24 \text{ hr}}{\text{Μέρα}} = 1,2 \text{ m/Μέρα}$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην ιδανική για την ανακυκλοφορία του νερού.

### ***Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)***

Το χρονικό διάστημα όπου το νερό εκροής από τη δεξαμενή των ψαριών διέρχεται από το φίλτρο καλείται υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού στο φίλτρο. Πολύ υψηλοί χρόνοι παραμονής (HRT) μειώνουν το ρυθμό με τον οποίο το νερό και επομένως ο αέρας ωθείται μέσω των κενών πόρων στα μέσα καλλιέργειας. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό αναερόβιων ζωνών κατάλληλες για απονιτροποίηση, μετατρέποντας έτσι πολύτιμα φυτικά θρεπτικά συστατικά από τη μορφή NO<sub>3</sub> σε ατμοσφαιρικό άζωτο (Endut et al. 2010). Χαμηλοί (μικροί) χρόνοι παραμονής μειώνουν την απόδοση αφαίρεσης-απομάκρυνσης των θρεπτικών μειώνοντας το χρόνο διήθησης.

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής υπολογίζεται διαιρώντας την επιφάνεια του φίλτρου (A<sub>s</sub>), το βάθος του νερού (H<sub>w</sub>) και το διάκενο της ύλης του μέσου καλλιέργειας του φίλτρου (Φ) με τον ρυθμό ροής του νερού. Για παράδειγμα, αν η επιφάνεια του φίλτρου είναι 6 m<sup>2</sup>, το βάθος είναι 5cm, η ποσότητα (διάκενο) είναι 0,47 και η ροή του νερού είναι 0,300 m<sup>3</sup>/hr. ο υδραυλικός χρόνος παραμονής υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλικό χρόνος παραμονής} &= \frac{A_{S*H_w*}\Phi}{Q_w} = \frac{6 \text{ m}^2 * 0,05 \text{ m} * 0,47}{0,30 \text{ m}^3/\text{ώρα}} * \frac{60 \text{ λεπτά}}{1 \text{ ώρα}} \\ &= 28,2 \text{ min} \end{aligned}$$

## **1.5 Θρεπτικά Συστατικά στην Ενυδραιοπονία και ο ρόλος τους στην ανάπτυξη των φυτών**

Τα φυτά έχουν διαφορετικές θρεπτικές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα, τα φυλλώδη πράσινα λαχανικά απαιτούν νιτρικά σε σχέση με τα καρποφόρα φυτά. Ωστόσο όλα τα φυτά στα ενυδραιοπονικά συστήματα χρειάζονται 16 απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για μέγιστη ανάπτυξη. Αυτά προέρχονται με τη μορφή μικροθρεπτικών συστατικών, τα οποία εκτός από τον άνθρακα, το υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία αντλεί από το νερό, είναι διοξείδιο του άνθρακα και ατμοσφαιρικό



αέρα, περιλαμβάνουν άζωτο (N), κάλιο (K), ασβέστιο (Ca), μαγνήσιο (Mg), φώσφορο (P), και θείο (S).

Υπάρχουν επίσης 7 μικροθρεπτικά συστατικά και είναι το χλώριο (Cl), ο σίδηρος (Fe), το μαγνήσιο (Mn), το βόριο (B), ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), και το μολυβδαίνιο (Mo). Αυτά τα θρεπτικά συστατικά θα πρέπει να είναι ισορροπημένα, καθώς η περίσσεια του ενός παρεμβαίνει στην πρόσληψη ενός άλλου, όπως συμβαίνει με το κάλιο το οποίο επηρεάζει τη βιοδιαθεσιμότητα του μαγνησίου ή του ασβεστίου. Οι συγκεντρώσεις σιδήρου στα απόβλητα των ψαριών είναι ανεπαρκείς για την ανάπτυξη των φυτών και ως εκ τούτου ο σίδηρος πρέπει να χορηγείται ως συμπλήρωμα χηλικού σιδήρου σε συγκέντρωση 2 mg/L (Rakocy et al. 2006).

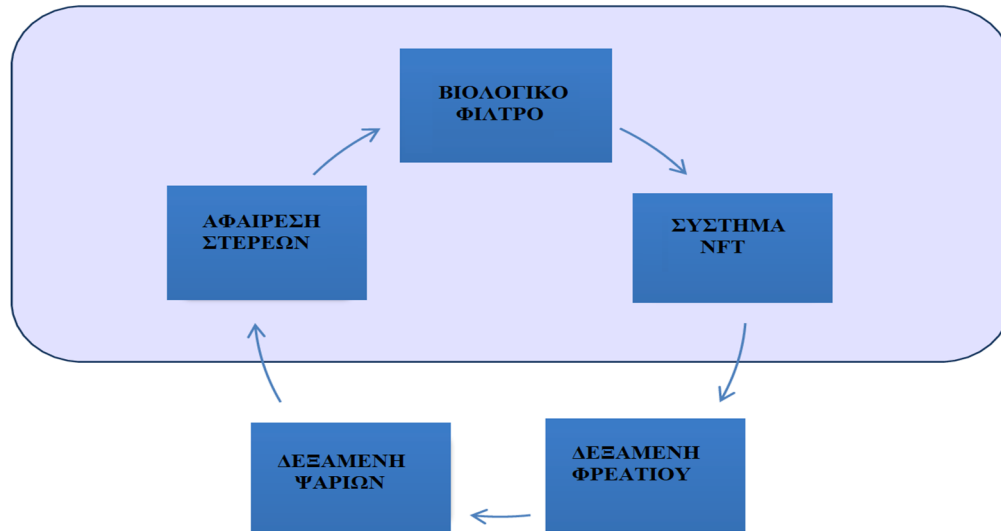
### **1.5.1. Ρυθμός Απορρόφησης (απομάκρυνσης) θρεπτικών συστατικών**

Η εξισορρόπηση των θρεπτικών συστατικών επιτυγχάνεται διαμέσου της ημερήσιας παροχής της τροφής των ψαριών σε σχέση με την καλλιεργητική περιοχή (εμβადόν) και τις απαιτήσεις των φυτών για ανάπτυξή τους. Ο ρυθμός απορρόφησης σχετίζεται με την εισροή ιχθυοτροφών ως προς την καλλιέργεια του φυτού σε σχέση με τις ισορροπημένες ροές των θρεπτικών ουσιών μεταξύ ψαριών και φυτών. Ωστόσο οι αναλογίες αυτές χρησιμοποιούν πλήρη απομάκρυνση των στερεών αποβλήτων των ψαριών, χωρίς να αντιπροσωπεύουν πλήρως τις αναλογίες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν για τα συστήματα όπου τα στερεά απόβλητα παραμένουν στο σύστημα για πλήρη ορυκτοποίηση και την ενδεχόμενη χρήση τους από τα φυτά.

Αυτό σημαίνει ότι είναι σκόπιμο να δοκιμαστούν μειωμένες εισροές ιχθυοτροφών για λόγους αναλογίας καλλιέργειας των φυτών σε σχέση με την ορυκτοποίηση των στερεών. Σε ένα τυπικό σύστημα ενυδρειοπονίας το νερό ρέει στα διάφορα τμήματα του συστήματος (Εικ.11) και με κατάλληλη ταχύτητα ώστε να διασφαλιστεί ο επιθυμητός ρυθμός παροχής του νερού και του αέρα και να βελτιστοποιηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος εκτροφής.

Σε γενικές γραμμές σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα, το νερό ρέει από την δεξαμενή εκτροφής ψαριών μέσω ενός μηχανισμού που απομακρύνει τα στερεά απόβλητα των ψαριών και τα γενικά υπολείμματα, στο βιολογικό φίλτρο όπου διαμέσου των βακτηρίων τα απόβλητα των ψαριών μετατρέπονται σε θρεπτικά συστατικά όπου είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη των φυτών προτού εισέλθει το νερό αυτό στην υδροπονική δεξαμενή όπου οι ρίζες των φυτών απορροφούν τα θρεπτικά

συστατικά καθώς αρδεύονται. Το καθαρό νερό από την υδροπονική δεξαμενή, ρέει προς το φίλτρο που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση σταθερών επιπέδων νερού πριν μεταφερθεί πίσω στην δεξαμενή εκτροφής ψαριών.



Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής στο ενυδρειοπονικό σύστημα (Rakocy et al. 2006)

### 1.6 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσης προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετήσει τον ρυθμό απομάκρυνσης της αμμωνίας σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας με τη μέθοδο του θρεπτικού υποστρώματος NFT, με παράλληλη καλλιέργεια λαβρακιού και ρόκας, σε τρεις διαφορετικές αλατότητες (1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt).

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα πειράματα μελέτης του ρυθμού απομάκρυνσης και απορρόφησης της αμμωνίας έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Ενυδρείων του Τμήματος Ζωϊκής Παραγωγής, Αλιείας και Υδατοκαλλιέργειών του Πανεπιστημίου Πατρών κατά το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 2019 έως Ιανουάριο 2020, και διήρκησε συνολικά 65 ημέρες.

### 2.1 Πειραματικός σχεδιασμός- Συνθήκες καλλιέργειας

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν 3 συστήματα ενυδρειοπονίας με τη μέθοδο του θεραπευτικού υποστρώματος NFT, τα οποία αποτελούνταν από 9 υάλινα ενυδρειακά συστήματα εκτροφής ψαριών σχήματος τετράγωνο και όγκου 38,2 Lτα οποία ανά 3 αποτελούσαν το ενυδρειοπονικό σύστημα, ένα φίλτρου τύπου sump και ένα σωλήνα PVC θεραπευτικού υποστρώματος NFT για την καλλιέργεια των φυτών.

Κάθε σύστημα απαρτίζονταν από 1,20 m μήκους κυλινδρικό κανάλι PVC το οποίο τοποθετήθηκε σε παράλληλη διάταξη στο επάνω μέρος των ενυδρειακών συστημάτων εκτροφής ψαριών δημιουργώντας ένα «κανάλι» θεραπευτικού υποστρώματος NFT με άνοιγμα διατομής Φ100 mm και λειτουργικό μήκος 1,16 m και όγκου 0,016 m<sup>3</sup> (Εικ.1) (Δεβετζόγλου 2021). Η απόληξη του καναλιού NFT κατέληγε σε μικρότερη διατομή Φ 25 mm στο οποίο προσαρμόστηκαν κατάλληλα εκατέρωθεν δύο σωλήνες άρδευσης Φ 20 mm εκ των οποίων ο ένας εξ αυτών συνδέθηκε με την αντλία βυθού (Ocean runner 2500 W) με σκοπό την ανακύκλωση του νερού στο σύστημα (Εικ. 12). Η απορροή του νερού από τα ενυδρειακά συστήματα και τον σωλήνα NFT κατέληγαν διαμέσου κοινού σωλήνα άρδευσης στο μηχανικό φίλτρο τύπου sump. Η αντλία βυθού λειτουργούσε συνεχόμενα όλο το 24 ώρο δημιουργώντας ανακύκλωση περίπου 3 φορές την ημέρα.

Η παροχή του νερού στα συστήματα υπολογίστηκε διαμέσου ενός ογκομετρικού σωλήνα 1000 mL, όπου σύμφωνα με τη μεθοδολογία μετριούνταν ο όγκος του νερού που εκτοπίζονταν στη μονάδα του χρόνου (10 sec) και υπολογίστηκε να είναι ίση με  $38,0 \pm 9,6 \text{ m}^3/\text{d}$ . Στη συνέχεια στα τρία συστήματα ενυδρειοπονίας ρυθμίστηκαν να έχουν παρόμοια και συνεχή παροχή νερού η οποία θα εξασφάλιζε μια σταθερή ταχύτητα φιλτραρίσματος ίση με 0,73 cm/min.

Ο αερισμός στα συστήματα ήταν συνεχής και παρέχονταν μέσω του κεντρικού καναλιού παροχής αέρα ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με αεραντλία (Siemens 3200pw) που βρίσκονταν στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου. Δια μέσου της

διαδικασίας αυτής διοχετεύονταν ατμοσφαιρικό οξυγόνο στα ενυδρεία εκτροφής και στο φίλτρο τύπου sump δημιουργώντας κορεσμό οξυγόνου της τάξης των 75% - 80%. Η βέλτιστη διάχυση του αέρα στα ενυδρεία εκτροφής και στον σωλήνα θρεπτικού υποστρώματος NFT (Εικ.14), επιτεύχθηκε μέσω μιας πέτρας αέρα από πυρόλιθο διαστάσεων 12 x 25 mm, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό σταθερή ροή αέρα που υπολογίστηκε ίση με  $16,5 \pm 8,81 \text{ cm}^3/\text{sec}$

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού έγινε με χρήση θερμαντικών μέσων τιτανίου (TH300,100W) οι οποίοι ήταν συνδεδεμένοι με ηλεκτρονικό μηχανήμα ρύθμισης της θερμοκρασίας (T2001 HC AQUAMEDIC) και διατήρησής της στους 22°C με 23°C καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και στις τρεις μεταχειρίσεις.



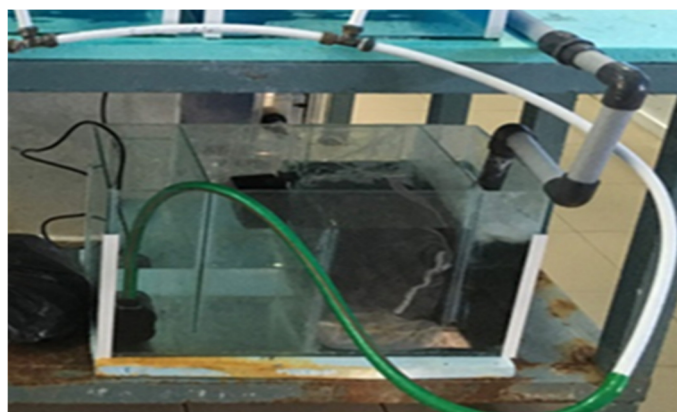
Εικόνα 11. Σύστημα ενυδρειοπονίας θρεπτικού υποστρώματος NFT. Διαφαίνονται τα ενυδρεία εκτροφής ιχθύων, το κανάλι θρεπτικού υποστρώματος NFT, ο φωτισμός και το φίλτρο τύπου sump (Πηγή: Δεβετζόγλου 2021)

Το κάθε σύστημα ενυδρειοπονίας ήταν συνδεδεμένο με φίλτρο τύπου sump διαστάσεων 72 x 31 x 40 cm και συνολικού όγκου 89,28 L, που ήταν τοποθετημένο κάτω από τα ενυδρεία εκτροφής (Εικ.13). Το κάθε φίλτρο ήταν χωρισμένο σε τρία τμήματα τα οποία λειτουργούσαν ως μηχανικό, βιολογικό φίλτρο και το τελευταίο τμήμα όπου συλλέγονταν το νερό μετά τη βιολογική επεξεργασία και χρησιμοποιούνταν ως χημικό φίλτρο προαιρετικά. Το μηχανικό φίλτρο είχε όγκο

24,8 L και αποτελούνταν από ειδικό σφουγγάρι πάχους 15 cm και ναλοβάμβακα πάχους 5 cm στο οποίο κατακρατούνταν στερεά σωματίδια που προέρχονταν από υπολείμματα τροφής και στερεά περιττώματα (κόπρανα) των ψαριών.

Το βιολογικό φίλτρο είχε όγκο 42,2 L στο οποίο προστέθηκαν ισόποσα 20 L βιόσφαιρες διαμέτρου 31,8 -38,1 mm με ειδική επιφάνεια SSA 600 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> και 20 L κεραμικό υλικό διαμέτρου 25 mm, με ειδική επιφάνεια SSA 1000 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>. Η ανάμειξη των υλικών πλήρωσης του φίλτρου είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της απόδοσης του φίλτρου δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό μέση συνολική ειδική επιφάνεια ίση με 800 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, και χρησιμοποιήθηκε ως βιολογικό υπόστρωμα ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* τα οποία χρησιμοποιούνταν αντίστοιχα, για την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη ιόντα και νιτρικά ιόντα.

Το τρίτο τμήμα του φίλτρου είχε όγκο 22,28 L και έπαιξε το ρόλο της δεξαμενής αποθήκευσης του νερού που προερχόταν από το βιολογικό φίλτρο απαλλαγμένο από αμμωνία, νιτρώδη ιόντα και περιείχε άφθονα νιτρικά ιόντα τα οποία χρησιμοποιούσαν τα φυτά για την ανάπτυξή τους. Επίσης περιστασιακά το εν λόγω τμήμα χρησιμοποιούνταν για χημικό φίλτρο (προσθήκη φίλτρου ενεργού άνθρακα ή UV, ή όζονιστήρας) για περαιτέρω επεξεργασία του νερού όπως για παράδειγμα ρύθμιση του pH του συστήματος ή περαιτέρω οξείδωση της αμμωνίας.

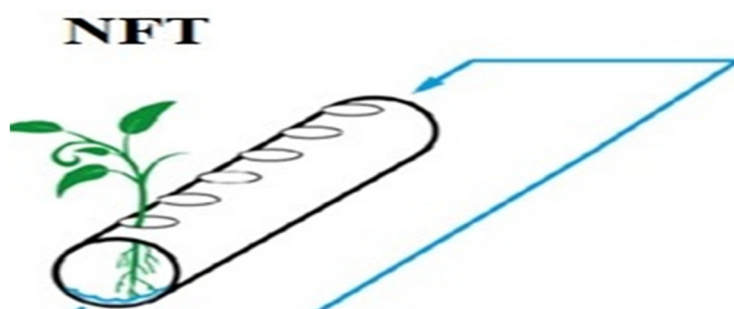


Εικόνα 12. Όψη του φίλτρου τύπου sump του συστήματος ενυδρείοπονίας. Διαφαίνονται από τα δεξιά προς τα αριστερά τα τμήματά του (μηχανικό φίλτρο, βιολογικό φίλτρο, δεξαμενή αποθήκευσης νερού ή χημικό φίλτρο) (Πηγή: Δεβετζόγλου 2021).

Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας κάθε σύστημα καθαρίστηκε και απολυμάνθηκε (νερό και οξικό οξύ 5%) και στη συνέχεια πληρώθηκε με γλυκό νερό και αφέθηκε να λειτουργήσει για 24 ώρες ώστε να εξατμιστεί κάθε ίχνος χλωρίου. Στην συνέχεια υπολογίστηκε η ποσότητα του αλατιού που χρειάστηκε να προστεθεί σε κάθε σύστημα προκειμένου η αλατότητα να φθάσει στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα.

Επίσης σε κάθε σύστημα και στο σωλήνα απορροής του ενυδρείου εκτροφής, προσαρμόστηκε κατάλληλα προστατευτικό δίχτυ για να αποτραπεί η είσοδος ψαριού σε αυτή και έχει ως συνέπεια να μπλοκάρει η λειτουργία του συστήματος. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 90 ιχθύδια λαβρακιού τα οποία προστέθηκαν ανά 30 λαβράκια σε κάθε σύστημα (10 άτομα/ενυδρείο) και είχαν μέσο βάρος  $3,92 \pm 0,83$  gr και μέσο μήκος  $7,62 \pm 0,47$  cm.

Πριν τα ιχθύδια προστεθούν στα συστήματα έγινε προληπτική αγωγή με εμβάπτισή τους σε διάλυμα φορμόλης 4% για χρονικό διάστημα 1 min. Τα ιχθύδια λαβρακιού μετά την αγωγή τοποθετήθηκαν σε κουβάδες με άφθονο οξυγόνο για 5-10 min και διαμοιράστηκαν τυχαία ανά 30 άτομα στα υφάλμυρα ενυδρειοπονικά συστήματα. Τέλος, στο επάνω μέρος του κάθε ενυδρείου εκτροφής τοποθετήθηκε προστατευτικό δίχτυ, διότι τα ψάρια ήταν αρκετά δραστήρια με αποτέλεσμα να «πηδούν» έξω από το νερό και να πεθαίνουν.



Εικόνα 13. Σωλήνας θρεπτικού υποστρώματος NFT, Διαφαίνονται οι οπές διαμέτρου 5 cm στο οποίο προσαρμόστηκαν τα ειδικά φυτοδοχεία με το υπόστρωμα (ελαφρόπετρα και άργιλος τύπου LECA) και η ρόκα (Πηγή: Δεβετζόγλου, 2021)

## **2.2 Προμήθεια ιχθύων λαβρακιού και φυτών ρόκας**

Η προμήθεια του γόνου λαβρακιού έγινε στις 26 Οκτωβρίου του 2019 από τον ιχθυογεννητικό σταθμό του ΝΗΡΕΑ που εδρεύει στη Μανάγουλη Φωκίδας, και μεταφέρθηκε στο εργαστήριο Ενυδρείων του Τμήματος Ζωικής Παραγωγής Αλιείας, Υδατοκαλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών. Τα λαβράκια για τον εγκλιματισμό και προσαρμογή τους στις ελεγχόμενες συνθήκες διαμοιράσθηκαν σε κουβάδες με νερό παρόμοιας αλατότητας (30 ppt) με εκείνη της σακούλας μεταφοράς και πλούσιο αερισμό, ώστε να προσαρμοστούν σταδιακά σε αλατότητα 25 ppt. Μετά από αρκετές ώρες (περίπου 4-5 ώρες) και μόλις τα λαβράκια προσαρμόστηκαν κατάλληλα, διαμοιράσθηκαν στα ενυδρεία αποθέματος με όγκο 400 L. Η διατροφή του λαβρακιού στις νέες συνθήκες άρχισε την επόμενη ημέρα και σταδιακά με χορήγηση μικρής ποσότητας τροφής.

Τα φυτά της ρόκας καλλιεργήθηκαν σε ειδικά σπορία και σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και φωτισμού. Μόλις η ανάπτυξή τους έφτασε στο ιδανικό μέγεθος μεταφύτευσης, μεταφυτεύτηκαν σε ειδικά πλαστικά φυτοδοχεία τα οποία ποτίζονταν με νερό αλατοτήτων 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt αντίστοιχα ανά δύο ημέρες για διάστημα περίπου 30 ημερών.

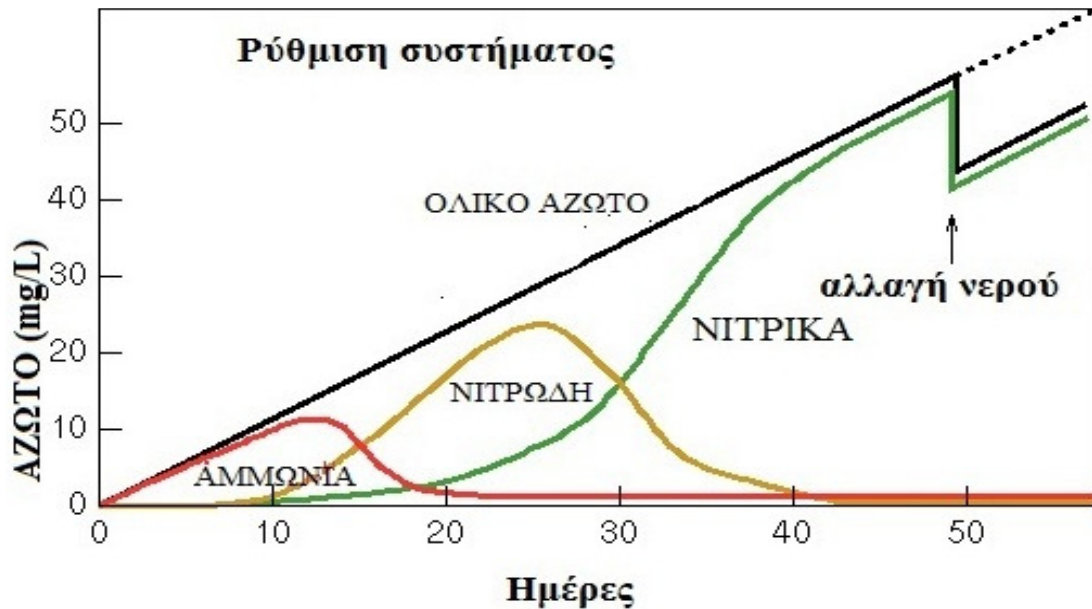
## **2.3 Έναρξη λειτουργίας και ρύθμιση συστημάτων ενυδρειοπονίας**

Ο Spotte (1992) αναφέρει ότι η βιολογική ρύθμιση ενός κλειστού συστήματος εκτροφής ψαριών επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- Εισαγωγή ψαριών
- Προσθήκη αμμωνίας
- Προσθήκη τροφής

Η βιολογική ρύθμιση του κάθε συστήματος ενυδρειοπονίας επιτεύχθηκε διαμέσου της μεθοδολογίας που περιγράφεται από τους Vlahos et al. (2004) και Vlahos et al. (2013). Αρχικά, για να επιτευχθεί η πλήρης εξάτμιση του χλωρίου από το νερό, τα συστήματα λειτούργησαν 24 h και έπειτα στα φίλτρα τους προστέθηκαν από 2-3 κόκκοι υλικού πλήρωσης (χαλίκια-μακαρόνι-σφαιρίδια) από ενυδρείο που λειτουργούσε ικανοποιητικά και τα βακτήρια του βιολογικού φίλτρου είχαν αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό.

Για την έναρξη της διαδικασίας ρύθμισης του φίλτρου προστέθηκαν 0,2 g  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ως πηγή αμμωνίας (Vlahos et al. 2004). Δύο φορές την εβδομάδα πραγματοποιούνταν μετρήσεις της ολικής αμμωνίας (Total Ammonium Nitrogen, T.A.N), των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_2^-$ ), των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ), του pH και του οξυγόνου, ώστε το σύστημα να ρυθμιστεί (Εικ.14).



Εικόνα 14. Διάγραμμα ρύθμισης βιολογικού φίλτρου ενός ενυδρείου (Πηγή: Spotte (1992), όπως τροποποιήθηκε από Βλάχο (2017)).

## 2.4 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος ενυδρειοπονίας

Η ενυδρειοπονία συνδυάζει την υδροπονία με την εκτροφή των υδρόβιων ζώων σε συστήματα ανακυκλωμένης υδατοκαλλιέργειας, είναι μία βιώσιμη μέθοδος παραγωγής οργανικών τροφίμων συνδυασμός της υδατοκαλλιέργειας με την ενυδρειοπονία. στα συστήματα ενυδρειοπονίας τα απόβλητα των ψαριών καθώς και οι ακατανάλωτες τροφές απορροφώνται από τις ρίζες των φυτών αντικαθιστώντας έτσι το κλασικό υδροπονικό φορτίο, παρέχοντας έτσι τα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Με αυτήν την διαδικασία τα φυτά παρέχουν ένα φυσικό φιλτράρισμα στο νερό όπου είναι και το περιβάλλον εκτροφής των ψαριών, διότι το νερό επαναχρησιμοποιείται από τα ψάρια. Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός οικοσυστήματος όπου ψάρια και φυτά μπορούν να αναπτυχθούν ταυτόχρονα. Τα προϊόντα που παράγονται από τα συστήματα ενυδρειοπονίας θεωρούνται προϊόντα βιολογικής καλλιέργειας υψηλής αξίας.



Ένα σύστημα ενυδρειοπονίας αποτελείται από δεξαμενές, φίλτρα, σωληνώσεις συνδυσασμένα κατάλληλα σε ένα σύστημα όπου θα διασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή συνύπαρξή του. Το νερό απορροής μεταφέρεται από την δεξαμενή των ψαριών στο μηχανικό φίλτρο για τον διαχωρισμό και την απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων και στην συνέχεια το νερό περνάει από το βιολογικό φίλτρο όπου εκεί η ολική αμμωνία τα βακτήρια, βιοχημικά θα οξειδωθεί σε νιτρικά ιόντα όπου είναι η προσιτή μορφή αζώτου για τα φυτά.

## **2.5 Διαχείριση πειραματικών συστημάτων**

Η διαχείριση του συστήματος περιλάμβανε έλεγχο της ποιότητας του νερού σε καθημερινή και εβδομαδιαία βάση, όπως για παράδειγμα μετρήσεις pH σε ημερήσια βάση και μετρήσεις αμμωνίας, νιτρικών ιόντων, νιτρικών ιόντων, φωσφορικών ιόντων και της αλκαλικότητας, δύο φορές την εβδομάδα.

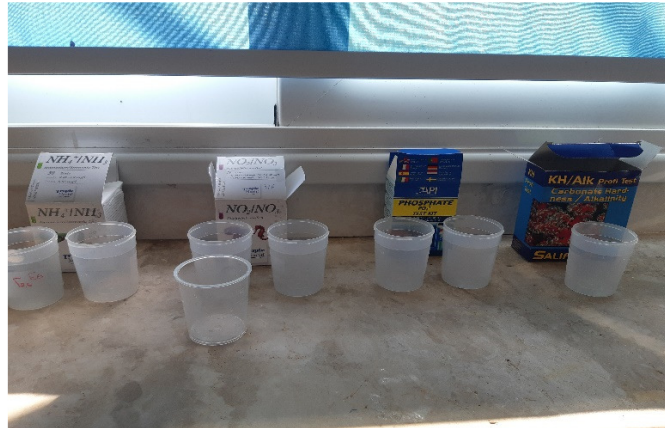
Επίσης, σε κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα ελέγχονταν καθημερινά η στάθμη του νερού στο σύνολο των δεξαμενών (υδροπονικές δεξαμενές και δεξαμενές εκτροφής) και όπου κρίνονταν αναγκαίο γίνονταν προσθήκη στα πειραματικά συστήματα με μερό παρόμοιας αλατότητας με εκείνη των συστημάτων λόγω εξάτμισης. Η μέση ποσοστιαία ανανέωση του νερού κυμάνθηκε από 0,75% για το σύστημα με αλατότητα 1,5 ppt , 0,66% για το σύστημα με αλατότητα 5 ppt και 0,71% για το ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 7 ppt.

## **2.6 Έλεγχος ποιότητας νερού**

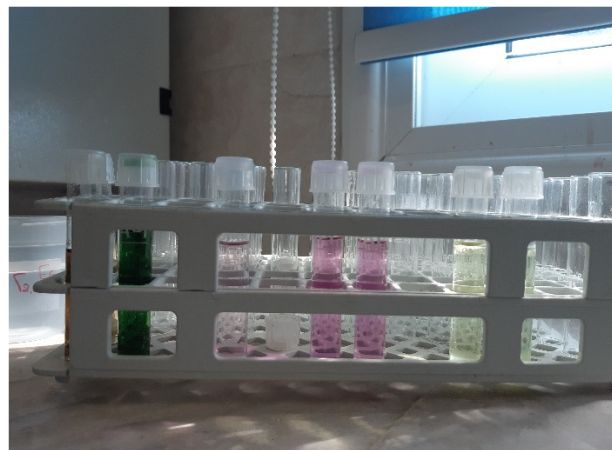
Η μέτρηση των παραμέτρων του νερού όπως η ολική αμμωνία (TAN), τα νιτρώδη ιόντα ( $\text{NO}_2^-$ ), τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ), τα φωσφορικά ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) και η αλκαλικότητα (KH), πραγματοποιούνταν δύο φορές την εβδομάδα κατά την διάρκεια του πειράματος με τη μέθοδο της χρωματομετρικής ανάλυσης (test kit).

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν πριν από το πρώτο γεύμα στην είσοδο της υδροπονικής δεξαμενής, έξοδος του νερού από την υδροπονική δεξαμενή στα ψάρια χρωματομετρικά (Εικ.15 & 16 & 17). Αναλυτικά η TAN μετρούνταν στην είσοδο (inlet) του νερού στο φίλτρο και στην έξοδο (outlet) του νερού από το φίλτρο. Τα  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{PO}_4^-$  μετρούνταν αντίστοιχα στην είσοδο του νερού προς την υδροπονική δεξαμενή (Grow bed) και στην έξοδο του νερού στη δεξαμενή των ψαριών.

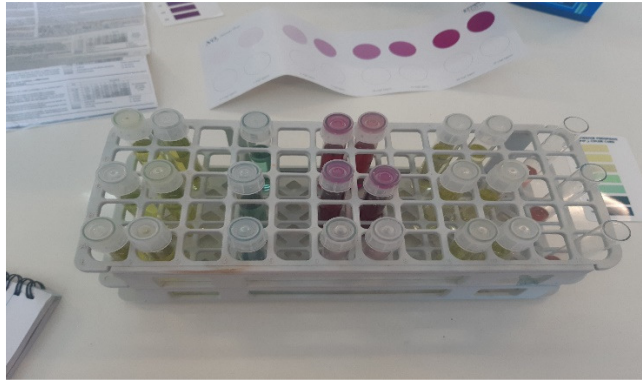
Η αλκαλικότητα και τα  $\text{NO}_2^-$ , μετριούνται επίσης μια φορά την εβδομάδα από την δεξαμενή εκτροφής των ψαριών. Το pH μετριούνται δύο φορές την εβδομάδα με φορητό ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης (HACH HQ 40 D). Τέλος, σε ημερήσια βάση γίνονταν έλεγχος της αλατότητας με οπτικό διαθλασίμετρο (Aqua Medic refractometer).



Εικόνα 15. Test kit και δοχεία συλλογής νερού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εβδομαδιαία δειγματοληψία μέτρησης της ποιότητας νερού των πειραματικών ενυδρειοπονικών συστημάτων. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 16. Χρωματομετρική μέτρηση χημικών στοιχείων από το πειραματικό ενυδρειοπονικό σύστημα. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 17. Χρωματομετρική μέτρηση χημικών στοιχείων από το πειραματικό ενυδρειοπονικό σύστημα. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο 2021)

Όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν test kit της εταιρείας Tropic Marin Analytics, της API και Salifer όπως περιγράφεται από τους Liddicoat et al. (1975) και στηρίζεται στη χρήση αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

#### **1. Μέτρηση αμμωνίας (TAN) ως εξής:**

- Προσθήκη σε κυψελίδα 5 mL νερό από το σύστημα.
- Προσθήκη 5 σταγόνων από το αντιδραστήριο #1.
- Ανακίνηση του δείγματος
- Προσθήκη 1 κουταλάκι από το αντιδραστήριο #2.
- Ανακίνηση και αναμονή για 1 λεπτό.
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο #3.
- Αναμονή 5 λεπτά έως το δείγμα νερού χρωματιστεί ανάλογα.
- Τέλος γίνονταν σύγκριση του δείγματος με τα χρώματα της καρτέλας του Test.

#### **2. Μέτρηση νιτρωδών ιόντων ως εξής :**

- Προσθήκη σε ειδική κυψελίδα 5 mL νερό από το σύστημα.
- Προσθήκη 5 σταγόνων από το αντιδραστήριο #1.
- Ανακίνηση.
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο #3.
- Αναμονή 5 min έως ότου το δείγμα νερού χρωματιστεί ανάλογα.
- Τέλος σύγκριση του δείγματος με τα χρώματα της καρτέλας του Test.

### **3. Μέτρηση νιτρικών ιόντων ( $NO_3$ ) ως εξής :**

- Προσθήκη σε κυψελίδα 5 mL νερό από το σύστημα.
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο #1.
- Ανακίνηση για 30 sec το αντιδραστήριο #2.
- Προσθήκη 5 σταγόνων από το αντιδραστήριο #2.
- Ανακίνηση για 5 sec
- Προσθήκη 10 σταγόνων από το αντιδραστήριο #3.
- Αναμονή 5 min έως ότου το δείγμα νερού χρωματιστεί ανάλογα.
- Τέλος σύγκριση του δείγματος με τα χρώματα της καρτέλας του Test.

### **4. Μέτρηση φωσφορικών ιόντων ( $PO_4^{3-}$ ) ως εξής :**

- Προσθήκη σε κυψελίδα 5 mL νερό από το σύστημα.
- Προσθήκη 6 σταγόνων από το αντιδραστήριο #1.
- Ανακίνηση.
- Προσθήκη 6 σταγόνων από το αντιδραστήριο #2.
- Αναμονή 5 min έως ότου το δείγμα νερού χρωματιστεί ανάλογα.
- Τέλος σύγκριση του δείγματος με τα χρώματα της καρτέλας του Test.

### **5. Μέτρησης αλκαλικότητας ( $KH$ ) ως εξής :**

- Προσθήκη σε κυψελίδα 2 mL νερό από το σύστημα.
- Προσθήκη 1 σταγόνας από το αντιδραστήριο #1.
- Ανακίνηση
- λήψη με σύριγγα 1 mL από το αντιδραστήριο #2.
- Στην συνέχεια έγινε προσθήκη από το αντιδραστήριο #2 στην κυψελίδα έως ότου αλλάξει χρώμα.
- Τέλος από πίνακα με αντιστοίχιση των mL που χρησιμοποιήθηκαν κατά την τιτλοδότηση, υπολογίζονταν ο βαθμός αλκαλικότητας σε γερμανικούς βαθμούς και σε βαθμούς meq.

## 2.7 Δείκτες υπολογισμού λειτουργικών παραμέτρων συστήματος ενυδρείοποιίας και απορρόφησης

Το υδραυλικό φορτίο (HLR), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού (t), ο ρυθμός ανακύκλωσης νερού (r), ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (P<sub>TAN</sub>) και η αποτελεσματικότητα του φίλτρου (E), υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις (Endut et al. 2010):

$$\mathbf{HLR} = \text{παροχή νερού (Q)} / \text{ολική επιφάνεια φίλτρου (W)}$$

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

**Υδραυλικός χρόνος παραμονής νερού (HLR) (t)** = επιφάνεια φίλτρου (W)\*βάθος νερού\*πορώδες υλικό φίλτρου (s) /παροχή νερού (Q)

Ο ρυθμός ανανέωσης του νερού σε κάθε σύστημα (%) και η εξάτμιση (%) υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$\text{ανανέωση (\%)} = \frac{\text{Ανανέωση/ημέρα (m}^3\text{)} * 100}{V \text{ (m}^3\text{)}}$$

$$\text{ανανέωση/ημέρα} = 0,24\text{m}^3 * \frac{\text{ποσότητα τροφής (kg)}}{1\text{kg τροφής}}$$

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (P<sub>TAN</sub>) και η ποσοστιαία απομάκρυνση του θρεπτικού (NRE, %) υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους τύπου που περιγράφονται αντίστοιχα από τους Ebeling et al. (2012) και Boxman et al. (2015):

$$P_{\text{TAN}} = \frac{FA * PC * 0,102}{t}$$

Όπου: FA = ποσότητα τροφής (gr)

PC = περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη

t = χρονική διάρκεια από το πρώτο στο δεύτερο γεύμα

0,102= συντελεστής που εξαρτάται από 16% της πρωτεΐνης της τροφής είναι N, το 80% του N είναι αφομοιώσιμο, το N που υπάρχει στα περιττώματα αφαιρείται από τη δεξαμενή και το 80% του N που αφομοιώνεται απεκκρίνεται (0,16\*0,8\*0,8=0,102)

$$\text{NRE (\%)} = (C_i - C_e) * 100 / C_i$$

Όπου  $C_i$  και  $C_e$ : συγκέντρωση θρεπτικού στην είσοδο και έξοδο της υδροπονικής δεξαμενής ή του φίλτρου στην περίπτωση της αμμωνίας.

**Η αποδοτικότητα του φίλτρου 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 απομάκρυνσης-οξείδωσης της αμμωνίας** στο φίλτρο υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (Kamstra et al. 1998)

$$\text{AAR} = (\text{TAN}_{\text{in}} - \text{TAN}_{\text{out}}) * Q * V^{-1} * S^{-1}$$

Όπου:

$\text{TAN}_{\text{in}}$  = Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$\text{TAN}_{\text{out}}$  = Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$  = παροχή νερού ( $\text{m}^3/\text{day}$ )

$V$  = Όγκος φίλτρου ( $\text{m}^3$ )

$S$  = ειδική επιφάνεια των μέσων ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

**Ογκομετρικός ρυθμός μετατροπής μάζας αμμωνίας VTR ( $\text{grTAN}/\text{m}^3/\text{d}$ )**

$$\text{VTR} = (\text{MTAN}_{\text{εξόδου}} - \text{MTAN}_{\text{εσόδου}}) / \text{Vol}$$

$\text{MTAN}_{\text{εσόδου}}$  = Μάζα αμμωνίας που εισέρχεται στο φίλτρο ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$\text{MTAN}_{\text{εξόδου}}$  = Μάζα αμμωνίας που εξέρχεται από το φίλτρο ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$\text{VOL}$  = Όγκος φίλτρου ( $\text{m}^3$ ) (συνολικός)

**Απομάκρυνση αμμωνίας στο υδροπονικό σύστημα -NFT TAN retained ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ )**

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

Όπου:

$Q$  = Παροχή νερού ( $\text{m}^3/\text{day}$ )

$C_{\text{in}}$  = Άνθρακας εισόδου

$C_{\text{out}}$  = Άνθρακας εξόδου

$V$  = Όγκος φίλτρου ( $\text{m}^3$ )

$d$  = Μεταβολή ( $C_{\text{out}}/dt$ )

### **Ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της TAN στο φίλτρο VTR biobiofilter (gTAN/m<sup>3</sup>/d)**

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

Όπου:

$$\text{TAN}_{\text{in}} = \text{Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$\text{TAN}_{\text{out}} = \text{Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$K_c = \text{Σταθερός αριθμός}$$

$$Q = \text{Παροχή νερού (m}^3\text{/day)}$$

$$V = \text{Όγκος φίλτρου (m}^3\text{)}$$

### **Φορτίο επιβάρυνσης N (mg/g\*d)**

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

Όπου:

$$\text{TAN}_{\text{in}} = \text{Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$\text{TAN}_{\text{out}} = \text{Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$V_f = \text{Όγκος δεξαμενής (L)}$$

### **Απομάκρυνση αμμωνίας (R<sub>TAN</sub>) = (TAN<sub>in</sub>-TAN<sub>out</sub>)\*Q/W**

Όπου:

$$\text{TAN}_{\text{in}} = \text{Αμμωνία που εισέρχεται στο φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$\text{TAN}_{\text{out}} = \text{Αμμωνία που εξέρχεται από το φίλτρο (g/m}^3\text{)}$$

$$Q = \text{παροχή νερού στο φίλτρο (m}^3\text{/d)}$$

$$W = \text{βάρος ιχθύων (gr)}$$

## **2.8 Στατιστική Ανάλυση**

Τα δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία (ποιότητα νερού, ρυθμοί απομάκρυνσης) επεξεργάστηκαν στατιστικά χρησιμοποιώντας την ανάλυση διακύμανσης μονής κατεύθυνσης (one way ANOVA) με επίπεδο σημαντικότητας 5% και κάνοντας χρήση του Tukey test προκειμένου να συγκριθούν οι διαφορές ανάμεσα στους μέσους όρους διαφόρων παραμέτρων (Zar, 1999). Η ομοιογένεια και η παραλλακτικότητα των μέσων όρων ελέγχθηκε σύμφωνα με Levene's test ενώ ο έλεγχος της κανονικότητας έγινε με το test Kolmogorov-Smirnov. Όταν οι διακυμάνσεις μεταξύ των μέσω όρων ήταν άνισες τότε εφαρμόστηκε η Kruskal wallis μονόδρομη ανάλυση διακύμανσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως μέσος όρος και τυπικό σφάλμα (MO ± SEM).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1 Ποιότητα νερού

Η ποιότητα του νερού στην ενυδραιοπονία αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες για την ορθή λειτουργία του συστήματος και την κατάλληλη συμβίωση των οργανισμών σε αυτό (Somerville et al. 2014). Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις των ανόργανων θρεπτικών συστατικών της TAN στα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού από το φίλτρο ( $TAN_{in, out}$ ), των νιτρικών ιόντων ( $NO_3^-_{in,}$  &  $NO_3^-_{out}$ ), των φωσφορικών ιόντων ( $PO_4^-$ ), στο σημείο εισόδου και εξόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή NFT και των νιτρωδών ιόντων ( $NO_2^-$ ) και ανθρακικής σκληρότητας (KH) στις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών για όλο το διάστημα των 65 ημερών. Η  $TAN_{in}$ , τα  $NO_2^-$ , τα  $NO_3^-_{in,}$  τα  $NO_3^-_{out}$ , τα  $PO_4^-_{in,}$   $PO_4^-_{out}$  και η KH δεν παρουσιάζουν σημαντικά στατιστικές διαφορές και στις τρεις μεταχειρίσεις (ANOVA,  $p>0.05$ ).  $TAN_{out}$  παρουσιάστηκε να είναι στατιστικά μεγαλύτερη στην αλατότητα 1,5 ppt (ANOVA,  $p<0.05$ ) σε σχέση με τις αλατότητες 5 ppt ( $0.28 \pm 0.05$  mg/L) και 7 ppt ( $0.39 \pm 0.06$  mg/L) και διακυμάνθηκε από  $0.51 \pm 0.06$  mg/L για το ενυδραιοπονικό σύστημα με αλατότητα 1.5 ppt,  $0.28 \pm 0.05$  mg/L για το σύστημα με αλατότητα 5 ppt και  $0.39 \pm 0.06$  mg/L για το σύστημα με αλατότητα 7 ppt.

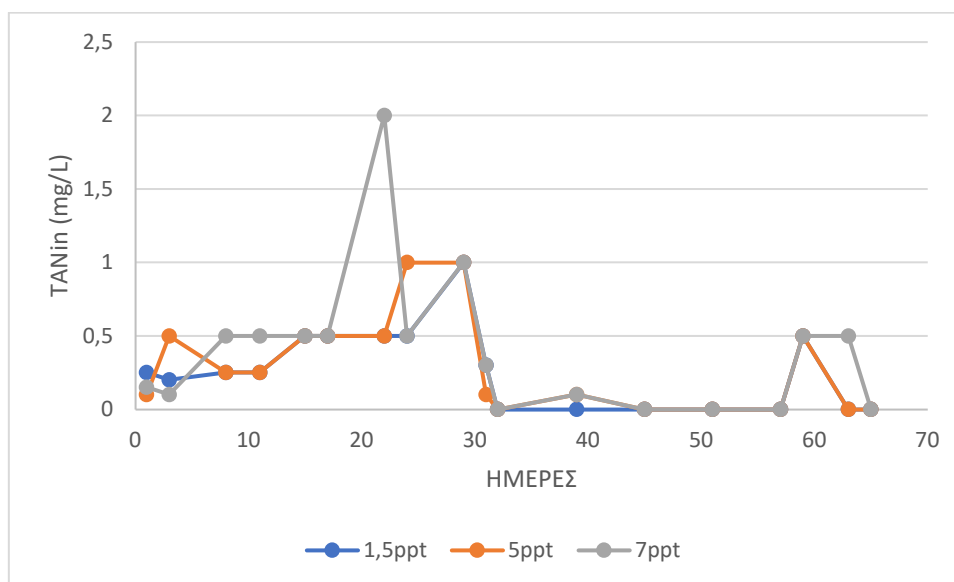
Πίνακας 4. Ποιότητα νερού στα συστήματα ενυδραιοπονίας λαβρακιού και ρόκας στις αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, στα σημεία in: εισροή του νερού στις δεξαμενές και το φίλτρο και out:απορροή του νερού από τις δεξαμενές καλλιέργειας φυτών.

	1,5 ppt	5 ppt	7 ppt
$TAN_{in}$	$0,26 \pm 0,02^a$	$0,46 \pm 0,08^a$	$0,47 \pm 0,09^a$
$TAN_{out}$	$0,51 \pm 0,06^a$	$0,27 \pm 0,05^b$	$0,39 \pm 0,06^b$
$NO_2$	$0,31 \pm 0,11^a$	$0,40 \pm 0,15^a$	$0,55 \pm 0,17^a$
$NO_3^-_{in}$	$85,27 \pm 11,66^a$	$67,08 \pm 11,13^a$	$61,94 \pm 13,09^a$
$NO_3^-_{out}$	$54,44 \pm 6,42^a$	$52,01 \pm 9,92^a$	$51,05 \pm 11,83^a$
$PO_4^-_{in}$	$0,73 \pm 0,13^a$	$0,82 \pm 0,16^a$	$0,71 \pm 0,65^a$
$PO_4^-_{out}$	$0,62 \pm 0,10^a$	$0,64 \pm 0,13^a$	$0,49 \pm 0,10^a$
KH	$4,14 \pm 0,54^a$	$4,44 \pm 0,46^a$	$3,85 \pm 0,64^a$

Τα δεδομένα εκφράζονται ως  $MO \pm S.E.M$ . Οι μέσοι όροι μεταξύ των μεταχειρίσεων που δεν φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) (n=16).



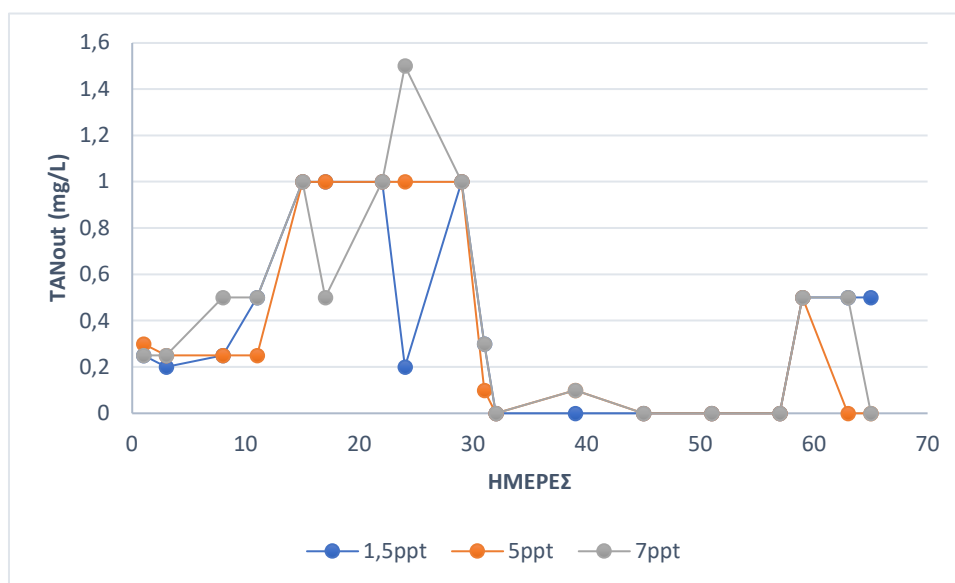
Στο Σχήμα 1, απεικονίζεται η διακύμανση της ολικής αμμωνίας στο σημείο εισόδου του νερού στο φίλτρο της. Στην αλατότητα 7 ppt, η αμμωνία παρουσίασε σημαντικές αυξήσεις που κυμαίνονταν από 0,0 έως και 2 mg/L, από την 17η έως και την 22η μέρα του πειράματος, ενώ μειώθηκε εξίσου σημαντικά από την 24η. Το σύστημα αυτό αποτύπωσε της μεγαλύτερες αυξομειώσεις συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα, με την μέση τιμή της αμμωνίας να κυμαίνεται στα 0,5 mg/L. Το ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 1,5 ppt παρουσίασε τις μικρότερες διακυμάνσεις στην αμμωνία με μέση τιμή 0,2 mg/L. Στην αλατότητα 5 ppt η TAN έλαβε μέση τιμή 0,25 mg/L και παρουσίασε απότομη διακύμανση από την 22η έως την 24η ημέρα του πειράματος, με μέγιστη τιμή να φτάνει 1 mg/L.



Σχήμα 1. Διάγραμμα μεταβολής της ολικής αμμωνίας  $TAN_{in}$  στο σημείο εισόδου του νερού στο φίλτρο στα συστήματα ενυδρειοπονίας με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt.

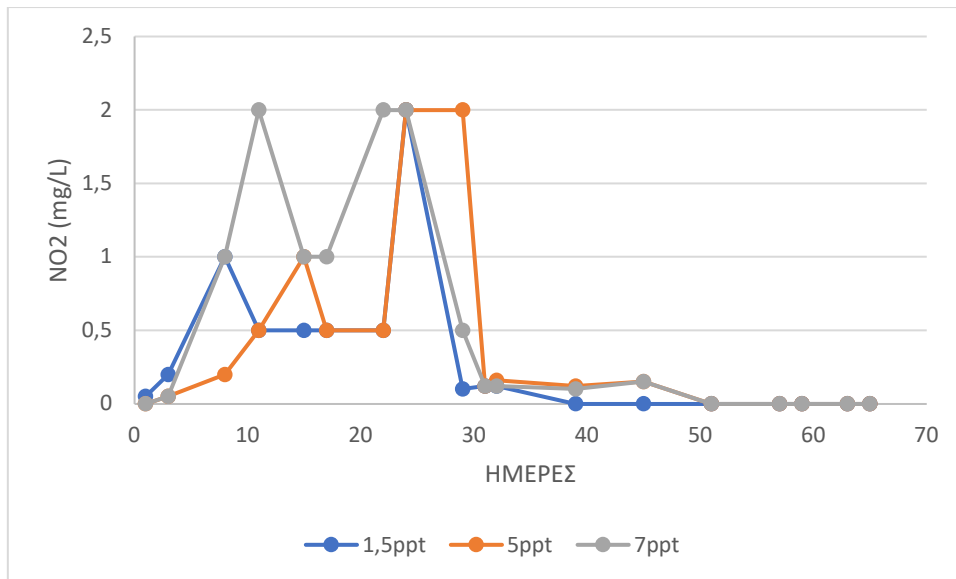
Σε ότι αφορά στην ολική αμμωνία  $TAN_{out}$  στο σημείο εξόδου, από το φίλτρο προς τη δεξαμενή εκτροφής των ψαριών και ανάπτυξης των φυτών (NFT), τα συστήματα αλατοτήτων 1,5 ppt και 7 ppt παρουσίασαν σημαντικές αυξομειώσεις, ενώ το σύστημα αλατότητας 5 ppt παρουσίασε πιο ομαλή διακύμανση (Σχ.2). Αναλυτικότερα, το σύστημα αλατότητας 1,5 ppt, με μέση τιμή ολικής αμμωνίας

εξόδου 1 mg/L, εμφάνισε απότομη άνοδο από την 8<sup>η</sup> - 15<sup>η</sup> μέρα με μέγιστη τιμή 1 mg/L. Το σύστημα αλατότητας 5 ppt εμφάνισε μέση τιμή 1 mg/L με μικρές διακυμάνσεις της αμμωνίας που κυμαίνονταν από 0,2-1 mg/L. Τέλος το σύστημα αλατότητας 7 ppt, με μέση τιμή ολικής αμμωνίας εξόδου 1 mg/L και αυτό, παρουσίασε σημαντική αύξηση συγκέντρωσης TAN<sub>out</sub> με μέγιστη τιμή 1,5 mg/L.



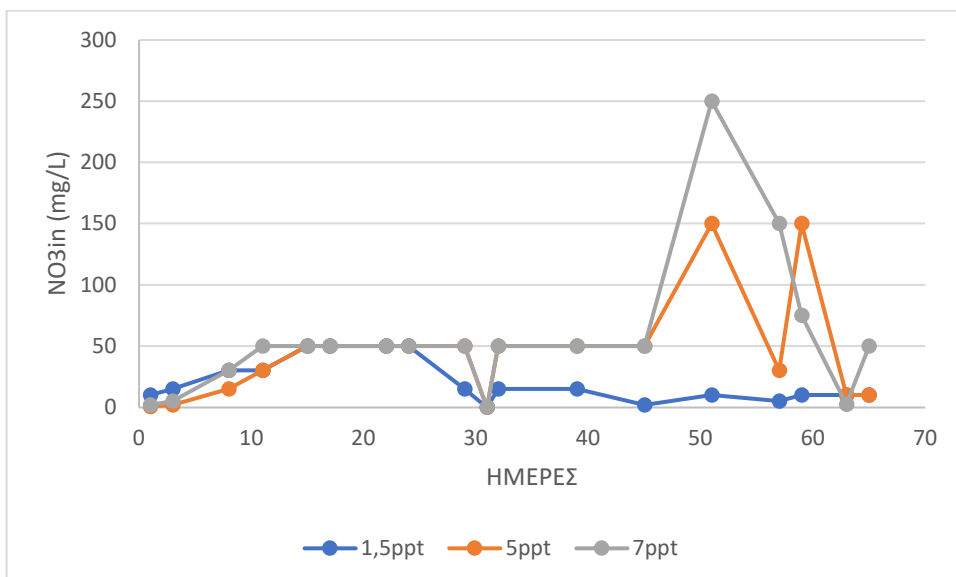
Σχήμα 2. Διάγραμμα μεταβολής της ολικής αμμωνίας TAN out στο σημείο εξόδου από το φίλτρο, όταν το νερό ρέει προς το σύστημα NFT των φυτών στα συστήματα ενυδρειοπονίας με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα για όλο το διάστημα της πειραματικής εκτροφής (65 ημέρες).

Η μεταβολή των νιτρικών ιόντων NO<sub>2</sub><sup>-</sup> δεν παρατηρήθηκε να είναι τόσο ομαλή μεταξύ των τριών ενυδρειοπονικών συστημάτων. Παρατηρήθηκε μια σταδιακή μείωση καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος και με το πέρας του τα NO<sub>2</sub><sup>-</sup> παρουσίασαν μηδενικές τιμές. Οι μέσες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ήταν 0,2 mg/L, 0,5 mg/L και 1 - 2 mg/L για αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt αντίστοιχα (Σχ.3).



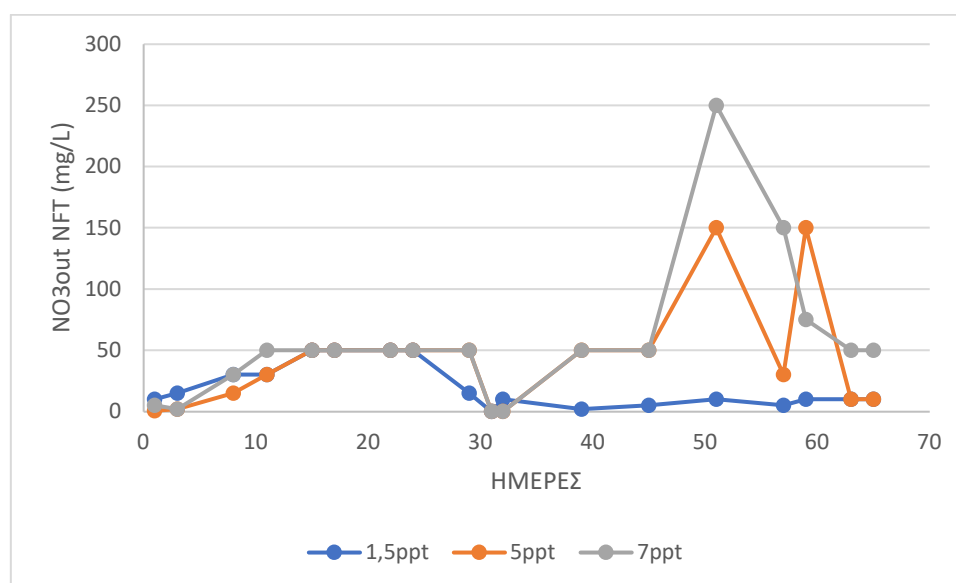
Σχήμα 3. Διάγραμμα μεταβολής των νιτρωδών ιόντων στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt διάρκειας 65 ημερών.

Τα νιτρικά ιόντα στην είσοδο  $\text{NO}_3^-_{in}$  και στα τρία ενυδρειοπονικά συστήματα παρουσίασαν αύξηση συγκέντρωσης ( $\text{NO}_3^-_{in}$ ) από την 3<sup>η</sup> - 11<sup>η</sup> μέρα του πειράματος ακολουθούμενη από μια μικρή σταδιακή μείωση από την 29<sup>η</sup> - 31<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος. Οι μέσες συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων εισόδου ήταν 15 mg/L, 50 mg/L και 50 mg/L για αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα (Σχ.4).



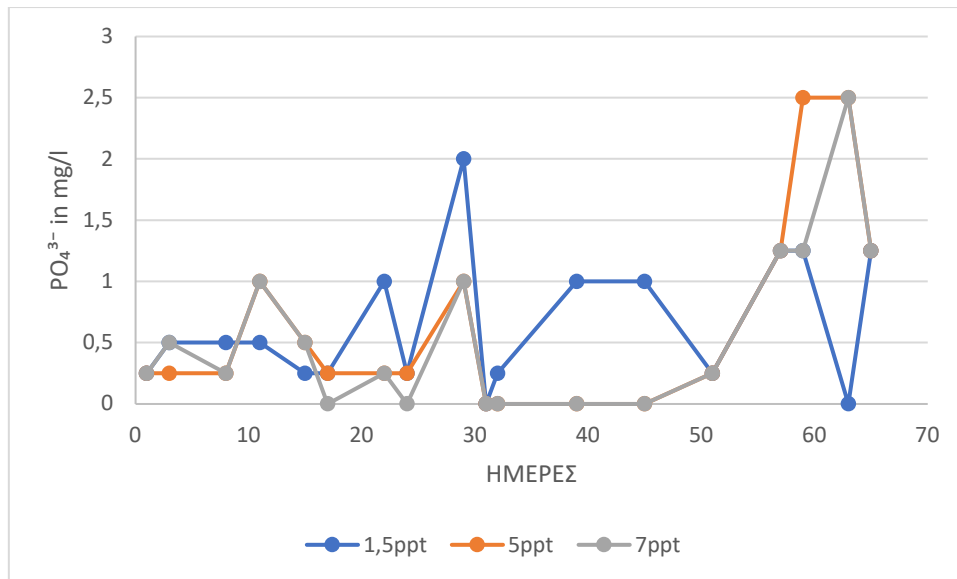
Σχήμα 4. Διάγραμμα μεταβολής των νιτρικών ιόντων στο σημείο εισόδου  $\text{NO}_3^-_{in}$  στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt διάρκειας 65 ημερών.

Το Σχήμα 5 αποτυπώνει τις διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στο σημείο εξόδου  $\text{NO}_{3\text{out}}$  το σύστημα νερού NFT. Παρατηρήθηκαν σημαντικές αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων στα δύο συστήματα με αλατότητες 5 ppt και 7 ppt. Αναλυτικότερα, σε όλα τα συστήματα παρατηρήθηκε μείωση των νιτρικών από την 1<sup>η</sup>-11<sup>η</sup> ημέρα της πειραματικής διαδικασίας ακολουθούμενη από εκθετική αύξηση συγκεντρώσεων κατά την 32<sup>η</sup> - 51<sup>η</sup> ημέρα με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 150 mg/L για τις δύο μεταχειρίσεις με αλατότητα 5 ppt και 7 ppt.



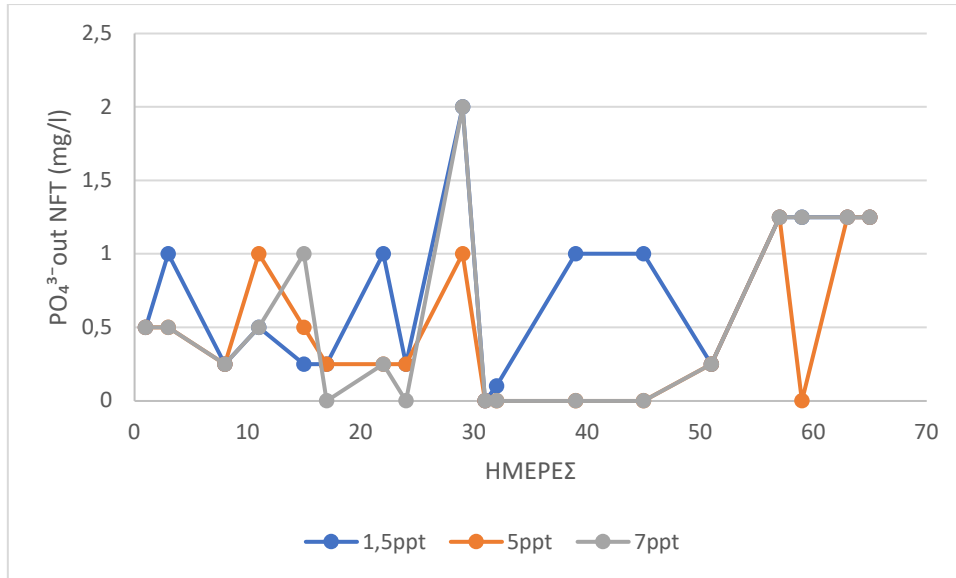
Σχήμα 5. Διάγραμμα μεταβολής των νιτρικών ιόντων  $\text{NO}_{3\text{out}}$  στο σημείο εξόδου του νερού από το NFT στις πειραματικές μεταχειρίσεις με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt για διάστημα 65 ημερών.

Στο Σχήμα 6 αποτυπώνεται τα  $\text{PO}_{4\text{in}}$  στο σημείο εισόδου του νερού στο υδροπονικό σύστημα NFT. Και στα τρία συστήματα διαφαίνεται μια σταδιακή ανοδική πορεία της συγκέντρωσης των φωσφορικών  $\text{PO}_{4\text{in}}$  καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα την 3<sup>η</sup> μέρα του πειράματος τα τρία συστήματα ξεκίνησαν με συγκεντρώσεις φωσφόρου που κυμαίνονταν από 0,5 - 1 mg/L και έφτασαν σε συγκεντρώσεις εύρους τιμών 1,25 - 2,5 mg/L την 57<sup>η</sup>, 59<sup>η</sup> και την 63<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων φωσφόρου  $\text{PO}_{4\text{in}}$  κυμαίνονταν από 0,50 mg/L, 0,25 mg/L και 1 mg/L για ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα.



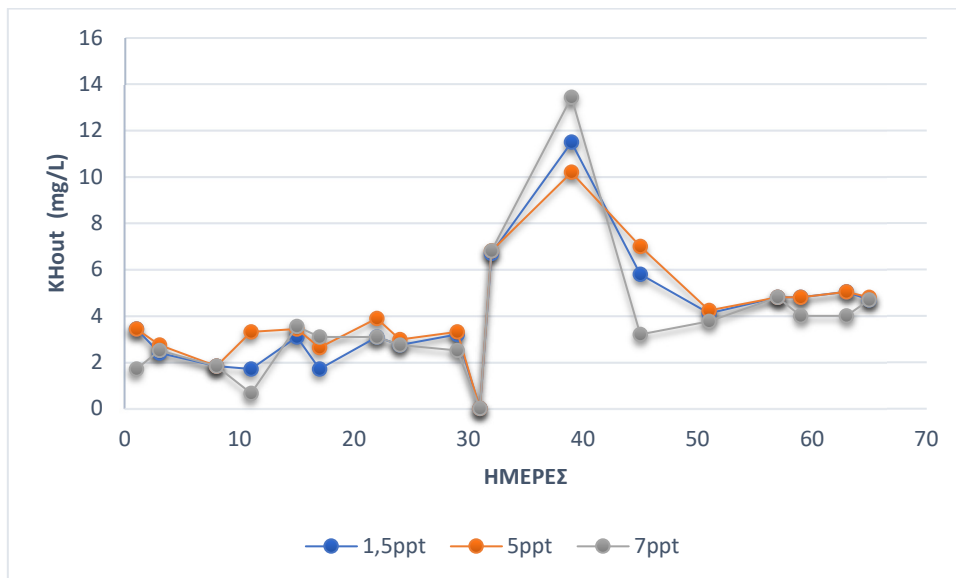
Σχήμα 6. Διάγραμμα μεταβολής του φωσφόρου ( $\text{PO}_4^{\text{in}}$ ) στα ενυδρειοπνικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt.

Τα φωσφορικά ιόντα  $\text{PO}_4^{\text{out}}$  στην έξοδο του NFT παρουσίασαν παρόμοια τάση με τα φωσφορικά ιόντα στο σημείο εισόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή NFT. Και στα τρία συστήματα παρατηρείται μια σταδιακή μεταβολή (αυξομειώσεις) της συγκέντρωσης των φωσφορικών  $\text{PO}_4^{\text{out}}$  τις πρώτες 20 ημέρες της πειραματικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα την 1<sup>η</sup> μέρα του πειράματος τα τρία συστήματα ξεκίνησαν με συγκεντρώσεις φωσφόρου που κυμαίνονταν από 0,5 - 1 mg/L και έφτασαν σε συγκεντρώσεις εύρους τιμών 1 – 2 mg/L την 29<sup>η</sup> του πειράματος. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων φωσφόρου  $\text{PO}_4^{\text{out}}$  κυμαίνονταν από 1 mg/L, 0,5 mg/L και 0,25 mg/L για τα ενυδρειοπνικά συστήματα με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα.



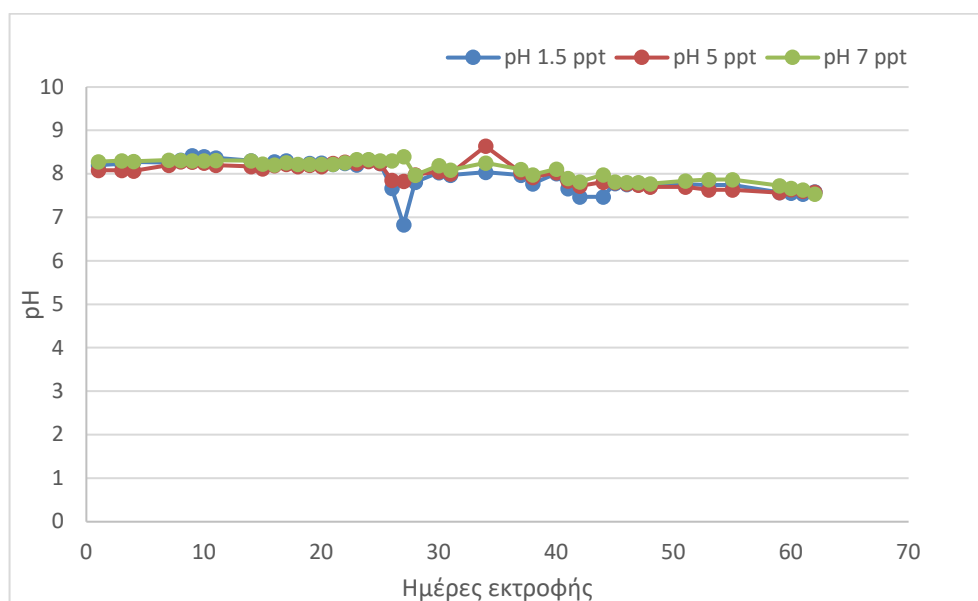
Σχήμα 7. Διάγραμμα μεταβολής των φωσφορικών ιόντων ( $\text{PO}_4^{\text{out}}$ ) στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt στο διάστημα της πειραματικής εκτροφής (65 ημέρες).

Η αλκαλικότητα ΚΗ παρουσίασε μια ομαλή διακυμάνση και στα τρία συστήματα διαφορετικών αλατοτήτων με μέσο εύρος τιμών που κυμαίνονταν από 4-6 mg/L. Παρατηρήθηκε μια αύξηση στην συγκέντρωση και στις τρεις αλατότητες την περίοδο μεταξύ της 31<sup>η</sup> έως 39<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, ακολουθούμενη από μια μείωση μεταξύ της 45<sup>η</sup> και 51<sup>η</sup>, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8. Διάγραμμα μεταβολής της αλκαλικότητας ΚΗ στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt χρονικής διάρκειας 65 ημερών.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή του pH στις δεξαμενές εκτροφής του λαβρακιού για τα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα. Το pH καθ' όλο το διάστημα της πειραματικής εκτροφής, ακολούθησε μια σταδιακή μείωση των τιμών σε όλες τις μεταχειρίσεις. Η μέση τιμή του pH και για τα τρία συστήματα ήταν 8 την πρώτη μέρα του πειράματος, καταλήγοντας σε τιμή 7, 54 την 43<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος.



Σχήμα 9. Διάγραμμα μεταβολής του pH στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt.

### 3.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά NFT

Ο Πίνακας 5, παρουσιάζει τις ημερήσιες ανάγκες σε νερό παρόμοιας αλατότητας που προστίθονταν στα πειραματικά ενυδρειοπονικά συστήματα καθ' όλο το διάστημα των 65 ημερών εξαιτίας της εξάτμισης. Η μέση ημερήσια προσθήκη νερού (ml ή L), και ο ποσοστιαίος ρυθμός ανανέωσης νερού δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές σε όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA,  $p > 0.05$ ). Η αριθμητική τιμή της ημερήσιας προσθήκης νερού λόγω εξάτμισης κυμαίνονταν από 2,43 L για το σύστημα με αλατότητα 1,5 ppt, 2,07 L για το σύστημα με αλατότητα 5 ppt και 2,21 L για το σύστημα με αλατότητα 7 ppt. Επίσης η ανανέωση του νερού και στις τρεις μεταχειρίσεις διακυμάνθηκε σε παρόμοια επίπεδα και ήταν

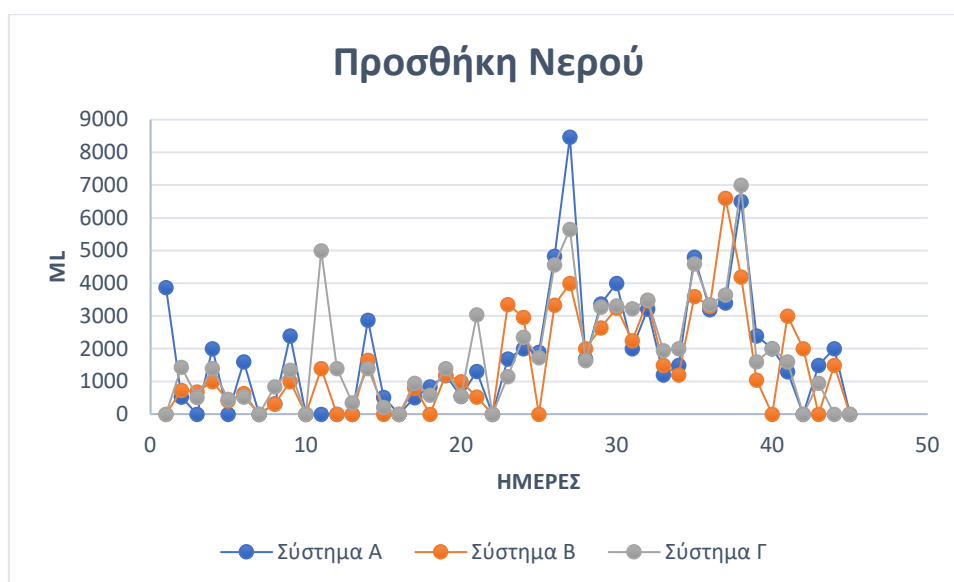
0,73% για το ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 1.5 ppt, 0,66% για το σύστημα με αλατότητα 5 ppt και 0,71% για το ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 7 ppt.

Πίνακας 5. Πρόσθηκη νερού στα ενυδρειοπονικά συστήματα καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής εκτροφής 65 ημέρες.

	1,5 ppt	5 ppt	7 ppt
Μέση ημερήσια προσθήκη νερού (mL)	2437,01 ±322,1 <sup>a</sup>	2070,9±278,3 <sup>a</sup>	2211,5±273,9 <sup>a</sup>
Μέση ημερήσια προσθήκη νερού (L)	2,43±0,32 <sup>a</sup>	2,07±0,27 <sup>a</sup>	2,21±0,27 <sup>a</sup>
Ανανέωση νερού (%)	0,73±0,10 <sup>a</sup>	0,66±0,08 <sup>a</sup>	0,71±0,09 <sup>a</sup>

Τα δεδομένα εκφράζονται ως MO± S.E.M. Οι μέσοι όροι μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) (n=41).

Στο Σχήμα 10 παρατηρούνται οι καθημερινές ανάγκες πλήρωσης σε νερό ανά ενυδρειοπονικό σύστημα και παρατηρούμε ότι και τα τρία πειραματικά συστήματα παρουσίασαν παρόμοια τάση όσον αφορά στην ημερήσια αναπλήρωση του νερού καθημερινά.



Σχήμα 10. Διάγραμμα καθημερινής προσθήκης νερού στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητα 1,5 ppt. 5 ppt και 7 ppt για όλο το διάστημα των 65 ημερών.



Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φίλτρου στα τρία ενυδρειοπονικά συστήματα θρεπτικού υποστρώματος NFT. Το υδραυλικό φορτίο HRL, ήταν στατιστικά μεγαλύτερο στις μεταχειρίσεις με αλατότητες 5 ppt και 7 ppt σε σχέση με τη μεταχείριση με αλατότητα 1,5 ppt που είχε μικρότερη τιμή (ANOVA,  $p < 0.05$ ) (Πιν.6) Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού στο φίλτρο (HRT) ήταν στατιστικά μεγαλύτερος στο ενυδρειοπονικό σύστημα με αλατότητα 1,5 ppt σε σύγκριση με τις αλατότητες 5 ppt και 7 ppt (ANOVA,  $p < 0.05$ ). Επίσης ο ρυθμός παραγωγής αμμωνίας ήταν στατιστικά μεγαλύτερος στις αλατότητες 5 ppt και 7 ppt σε σύγκριση με την αλατότητα 1,5 ppt που παρουσίασε μικρότερη τιμή (ANOVA,  $p < 0.05$ ) (Πιν 6). Ο ρυθμός ανακύκλωσης και η αποτελεσματικότητα του ενυδρειοπονικού συστήματος παρουσιάστηκε να είναι στατιστικά μεγαλύτερη στην αλατότητα 1,5 ppt σε σύγκριση με τις αλατότητες 5 ppt και 7 ppt που παρουσίασε την μικρότερη τιμή της (ANOVA,  $p < 0.05$ ) (Πιν.6).

Πίνακας 6. Λειτουργικά χαρακτηριστικά φίλτρου στα συστήματα ενυδρειοπονίας με αλατότητα 1.5 ppt, 5 ppt και 7 ppt, αντίστοιχα.

	1.5 ppt	5 ppt	7 ppt
Υδραυλικό φορτίο HLR (cm/d)	5,52 ± 0,02 <sup>a</sup>	6,09 ± 0,25 <sup>b</sup>	6,02 ± 0,04 <sup>b</sup>
Υδραυλικός χρόνος παραμονής HRT (min)	3,08 ± 0,01 <sup>a</sup>	2,71 ± 0,03 <sup>b</sup>	2,71 ± 0,03 <sup>b</sup>
Ρυθμός παραγωγής αμμωνίας P <sub>TAN</sub> (mg/L)	0,37 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,58 ± 0,06 <sup>b</sup>	1,58 ± 0,06 <sup>b</sup>
Ρυθμός ανακύκλωσης (r)	5,01 ± 0,02 <sup>a</sup>	3,46 ± 0,04 <sup>b</sup>	3,46 ± 0,04 <sup>b</sup>
Αποδοτικότητα ενυδρειοπονικού συστήματος E	1,55 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,82 ± 0,00 <sup>b</sup>	0,82 ± 0,00 <sup>b</sup>

Τα δεδομένα εκφράζονται ως MO ± S.E.M. Οι μέσοι όροι μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) (n=27).

### 3.3 Απομάκρυνση θρεπτικών -Απόδοση Συστήματος NFT

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τον ρυθμό απομάκρυνσης της αμμωνίας καθώς και την ποσοστιαία απομάκρυνση της αμμωνίας στο φίλτρο των τριών πειραματικών μεταχειρίσεων. Η ποσοστιαία απορρόφηση των θρεπτικών (ολικής αμμωνίας) από τα φυτά (NRE) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές και στις τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις (ANOVA,  $p > 0,05$ ). Η απομάκρυνση της αμμωνίας ( $R_{TAN}$ ) στο φίλτρο παρουσίασε στατιστικά μεγαλύτερη τιμή στην μεταχείριση με αλατότητα 7 ppt σε σχέση με τις μεταχειρίσεις 5 ppt και 1,5 ppt (ANOVA,  $p < 0,05$ ). Επίσης, ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας παρουσίασε στατιστικά μεγαλύτερες τιμές στις μεταχειρίσεις με αλατότητες 1,5 ppt και 7 ppt σε σχέση με την μεταχείριση με αλατότητα 5 ppt που ήταν μικρότερη (Πιν.7).

Πίνακας 7. Ρυθμός απομάκρυνσης των της αμμωνίας και ποσοστιαία απομάκρυνση της αμμωνίας στο φίλτρο των τριών πειραματικών μεταχειρίσεων με αλατότητες 1.5 ppt, 5 ppt και 7 ppt.

	1.5 ppt	5 ppt	7 ppt
Απομάκρυνση αμμωνίας $R_{TAN}$ (mg/L)	$0,32 \pm 0,10^a$	$0,17 \pm 0,03^a$	$0,74 \pm 0,19^b$
Ρυθμός μετατροπής -οξείδωσης αμμωνίας AAR (gr/m <sup>2</sup> /d)	$0,66 \pm 0,13^b$	$0,10 \pm 0,02^a$	$0,82 \pm 0,21^b$
Ποσοστιαία απορρόφηση θρεπτικών (ολικής αμμωνίας) NRE (%) από φυτά.	$42,59 \pm 4,05^a$	$40,58 \pm 3,56^a$	$41,06 \pm 6,78^a$

Τα δεδομένα εκφράζονται ως  $MO \pm S.E.M$ . Οι μέσοι όροι μεταξύ των μεταχειρίσεων που δεν φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0,05$ ) (n=50).

Σε ότι αφορά τους δείκτες απόδοσης του συστήματος ως προς την αποτελεσματικότητα μετατροπής της αμμωνίας και στις τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Ο ογκομετρικός ρυθμός μετατροπής της μάζας της αμμωνίας (VTR), ο ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας στο υδροπονικό σύστημα NFT από τα φυτά, Ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της

αμμωνίας στο φίλτρο (VTR filter) και το φορτίο επιβάρυνσης αζώτου (N) που δημιουργήθηκε από την παρεχόμενη τροφή των ιχθύων δεν παροσίασαν σημαντικές στατιστικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) (Πιν.8).

Πίνακας 8. Δείκτες απόδοσης φίλτρου στα ενυδρειοπονικά συστήματα με αλατότητες 1,5ppt, 5 ppt και 7 ppt.

	1.5 ppt	5 ppt	7 ppt
Ογκομετρικός ρυθμός μετατροπής μάζας αμμωνίας VTR (grTAN/m <sup>3</sup> /d)	1.38 ± 0,23 <sup>a</sup>	1,19 ± 0,22 <sup>a</sup>	1,23 ± 0,32 <sup>a</sup>
Απομάκρυνση αμμωνίας στο υδροπονικό σύστημα -NFT TAN retained (g/m <sup>2</sup> /d)	1,11 ± 0,19 <sup>a</sup>	0,95 ± 0,18 <sup>a</sup>	0,92 ± 0,25 <sup>a</sup>
Ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της TAN στο φίλτρο -VTR biobiofilter (gTAN/m <sup>3</sup> /d)	28,79 ± 4,98 <sup>a</sup>	25,20 ± 4,83 <sup>a</sup>	27.31 ± 7,15 <sup>a</sup>
Φορτίο επιβάρυνσης N (mg/g*d)	62,83 ± 13,29 <sup>a</sup>	69,29 ± 14,85 <sup>a</sup>	73,31 ± 19,53 <sup>a</sup>

Τα δεδομένα εκφράζονται ως MO ± S.E.M. Οι μέσοι όροι μεταξύ των μεταχειρίσεων που δεν φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) (n=51).

## 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Ποιότητα νερού

Οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού, καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας διατηρήθηκαν σε σταθερά επίπεδα χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0.05$ ) και στις τρεις μεταχειρίσεις, με εξαίρεση την ολική αμμωνία στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή καλλιέργειας των φυτών η οποία παρουσιάστηκε να είναι στατιστικά μεγαλύτερη στην μεταχείριση με αλατότητα 1.5 ppt (ANOVA,  $p < 0.05$ ).

Σε ότι αφορά το pH, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι κυμάνθηκε εντός των ορίων που προτείνουν οι Somerville et al. (2014) για τα συστήματα ενυδρειοπονίας. Το pH κυμάνθηκε από 7,5 έως 8 και στα τρία συστήματα ενυδρειοπονίας με αλατότητες 1,5 ppt, 5 ppt 7 ppt, αντίστοιχα, χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές και ήταν ελαφρώς υψηλότερο από το pH (7,4 - 7,5) που αναφέρεται στην εργασία των Vlahos et al. (2019) σε ενυδρειοπονικά συστήματα υφάλμυρου νερού με κρίταμο και τσιπούρα σε αλατότητες 8 ppt και 20ppt.

Στο παρών πείραμα οι συγκεντρώσεις της ολικής αμμωνίας και των νιτρικών ιόντων διακυμάνθηκαν από  $0,26 \text{ mg/L} \pm 0,02 \text{ mg/L}$  έως  $0,51 \text{ mg/L} \pm 0,06 \text{ mg/L}$ ,  $0,46 \text{ mg/L} \pm 0,08 \text{ mg/L}$  έως  $0,27 \text{ mg/L} \pm 0,05 \text{ mg/L}$  και  $0,47 \text{ mg/L} \pm 0,09 \text{ mg/L}$  έως  $0,39 \text{ mg/L} \pm 0,06 \text{ mg/L}$ , αντίστοιχα για τις πειραματικές μεταχειρίσεις με αλατότητα 1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt. Οι Nozzi et al. (2016) στα πειράματα που διεξήγαγαν αναφέρουν τιμές  $0,05 \text{ mg/L}$  για την αμμωνία και  $0,1 \text{ mg/L}$  για τα νιτρικά ιόντα, οι οποίες είναι κατά πολύ μικρότερες από εκείνες του παρόντος πειράματος.

Σε ότι αφορά τα νιτρικά ιόντα στο σημείο εισόδου του νερού στην υδροπονική δεξαμενή διακυμάνθηκαν από  $85,27 \pm 11,66 \text{ mg/L}$  για την υδροπονική δεξαμενή με αλατότητα 1,5 ppt,  $67,08 \pm 11,13 \text{ mg/L}$  για τη μεταχείριση με αλατότητα 5 ppt και  $61,94 \pm 13,09 \text{ mg/L}$  για την μεταχείριση με αλατότητα 7 ppt. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή NFT διακυμάνθηκε από  $54,44 \pm 6,42 \text{ mg/L}$  για την αλατότητα 1,5 ppt,  $52,01 \pm 9,92 \text{ mg/L}$  για την αλατότητα 5 ppt και  $51,05 \pm 11,83 \text{ mg/L}$  για την αλατότητα 7 ppt. Οι μειωμένες τιμές στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στο σημείο εξόδου από την υδροπονική δεξαμενή υποδηλώνουν ότι η ρόκα, απορρόφησε νιτρικά ιόντα κατά την περίοδο των 45 ημερών που διήρκτησε η πειραματική εκτροφή της, αποδίδοντας στατιστικά σημαντική ανάπτυξη μεταξύ των μεταχειρίσεων (Δεβετζογλου 2021).

Επίσης οι συγκεντρώσεις στα νιτρικά ιόντα στο σημείο εισόδου κυμάνθηκαν σε παρόμοιο επίπεδο με τις τιμές που αναφέρονται από τους Vlahos et al. (2019) σε υφάλμυρο σύστημα ενυδραιοπονίας με τσιπούρα και κρίταμο (76,4 έως 77,2 mg/L). Επίσης οι Nozzi et al. (2016) σε υφάλμυρο σύστημα ενυδραιοπονίας με λαβράκι και σέσκουλο αναφέρουν τιμές στα νιτρικά ιόντα στο σημείο εξόδου της υδροπονικής δεξαμενής 60 mg/L.

Σε ότι αφορά τα φωσφορικά ιόντα στο παρόν πείραμα διακυμάνθηκαν από  $0,73 \pm 0,13$  mg/L για τη μεταχείριση με αλατότητα 1,5 ppt,  $0,82 \pm 0,16$  mg/L με αλατότητα 5 ppt και  $0,71 \pm 0,65$  mg/L για τη μεταχείριση με αλατότητα 7 ppt, χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (ANOVA,  $p > 0,05$ ). Ομοίως τα φωσφορικά στο σημείο εξόδου του νερού από την υδροπονική δεξαμενή NFT, διακυμάνθηκαν μεταξύ  $0,62 \pm 0,10$  mg/L για την αλατότητα 1,5 ppt,  $0,64 \pm 0,13$  mg/L για την αλατότητα 5 ppt και  $0,49 \pm 0,10$  mg/L για την αλατότητα 7 ppt. Η Τάσιου (2019) αναφέρει τιμές πολύ μεγαλύτερες στα φωσφορικά ιόντα στα σημεία εισόδου (2,78-4,93 mg/L) και εξόδου (1.25-1.57 mg/L) του νερού από την υδροπονική δεξαμενή σε σχέση με τις τιμές του παρόντος πειράματος. Η αλκαλικότητα διακυμάνθηκε από 4,14 mg/L για την αλατότητα 1,5 ppt, 4,44 mg/L για την αλατότητα 5 ppt και 3,85 mg/L για την αλατότητα 7 ppt χωρίς να παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές και ήταν παρόμοιες με εκείνες που αναφέρει η Τάσιου (2019).

#### **4.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά**

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φίλτρου, ο ογκομετρικός ρυθμός μάζας αμμωνίας, η απομάκρυνση της αμμωνίας στο υδροπονικό σύστημα, ο ογκομετρικός ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας στο φίλτρο και το φορτίο επιβάρυνσης δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των 3 μεταχειρίσεων (1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt) (ANOVA,  $p > 0,05$ ).

Στο παρόν πείραμα το υδραυλικό φορτίο υπολογίστηκε 5 m/d, και ήταν μεγαλύτερο από εκείνο (2,56 m/d) που αναφέρουν οι Endut et al. (2010), για ένα σύστημα ενυδραιοπονίας με γλυκό νερό. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, ο ρυθμός ανακύκλωσης και η ειδική επιφάνεια του φίλτρου του παρόντος πειράματος, ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες που αναφέρουν οι Vlahos et al. (2019). Οι Nozzi et al. (2016) και οι Chen et al., (2006) αναφέρουν ότι το υδραυλικό φορτίο επηρεάζει την

παραγωγικότητα του συστήματος (ανάπτυξη ψαριών και φυτών) και την ημερήσια πρόσληψη των θρεπτικών από τα φυτά. Επίσης ο υδραυλικός χρόνος παραμονής επηρεάζει την αποδοτικότητα του βιολογικού φίλτρου σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας.

#### 4.3 Ρυθμός απομάκρυνσης θρεπτικών

Η ποσοστιαία απορρόφηση των θρεπτικών (ολικής αμμωνίας) από τα φυτά (NRE) στη υδροπονική δεξαμενή, δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές και στις τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις. (ANOVA,  $p>0,05$ ).

Στη συγκεκριμένη εργασία η ποσοστιαία απομάκρυνση της αμμωνίας παρουσίασε υψηλές τιμές. Συγκριτικά με την ποσοστιαία απομάκρυνση της αμμωνίας που αναφέρουν οι Gichana et al. (2019) οι τιμές του παρόντος πειράματος ήταν μικρότερες ήταν υψηλότερες

Η απομάκρυνση της αμμωνίας ( $R_{TAN}$ ) στο φίλτρο παρουσίασε στατιστικά υψηλότερη τιμή στην μεταχείριση με αλατότητα 7 ppt (ANOVA,  $p<0.05$ ) και ήταν μικρότερος από εκείνο που αναφέρει η Τάσιου (2019) σε ενυδρειοπονικό σύστημα με λαβράκι και κρίταμο σε υφάλμυρο νερό. Οι τιμές της  $R_{TAN}$  διακυμάνθηκαν από  $0,74 \pm 0,19$  mg/L για την αλατότητα 7 ppt,  $17 \pm 0.03$  mg/L για την αλατότητα 5ppt και  $0,32 \pm 0,10$  mg/L για την αλατότητα 1,5ppt.

Τέλος, ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας στα συστήματα με αλατότητες 1,5 ppt ( $0,66 \pm 0,13$  gr/m<sup>2</sup>/d) και 7 ppt ( $0,82 \pm 0,21$  gr/m<sup>2</sup>/d) παρουσίασε μεγαλύτερες διαφορές, σε σχέση με την αλατότητα 5 ppt ( $0,10 \pm 0,02$  gr/m<sup>2</sup>/d) που ήταν μικρότερη, λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων στα νιτρώδη ιόντα.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας σε υφάλμυρο σύστημα ενυδρειοπονίας που καλλιεργήθηκε λαβράκι και ρόκα με τη μέθοδο του θρεπτικού υποστρώματος NFT σε τρεις διαφορετικές αλατότητες (1,5 ppt, 5 ppt και 7 ppt).

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης πτυχιακής έδειξαν ότι η συγκαλλιέργεια μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα (NFT) και να μας προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα ώστε και τα ψάρια αλλά και τα φυτά να ικανοποιητική ανάπτυξη. Και αυτό επιτυγχάνεται λόγω της σημαντικής αναλογίας του όγκου του νερού στα φυτά.

Η ποιότητα του νερού, καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας διατηρήθηκε σε σταθερά επίπεδα σε όλες τις μεταχειρίσεις, οι τιμές βρίσκονταν εντός των ορίων που προτείνονται για τη βιωσιμότητα των ενυδρειοπονικών συστημάτων.

Τα φυτά σύμφωνα με τα αποτελέσματα απορρόφησαν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά τα οποία χρησιμοποιούσαν για την ανάπτυξή τους. Ο ρυθμός απομάκρυνσης ήταν της τάξης 40% - 42%.

Το φορτίο επιβάρυνσης (N) παρουσιάστηκε να είναι αυξημένο εξαιτίας της συνολικής βιομάζας των ψαριών που υπήρχε σε κάθε σύστημα εκτροφής το οποίο υποδύκνυε ότι τα λαβράκια κατανάλωναν την τροφή που τους προσφέρονταν.

Το υδραυλικό φορτίο, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, ο ρυθμός ανακύκλωσης, ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής αμμωνίας, και η αποτελεσματικότητα του βιολογικού φίλτρου επηρεάζουν τον ρυθμό απομάκρυνσης της αμμωνίας, υποδηλώνοντας, με τον τρόπο αυτό την εύρηθημη λειτουργία των συστημάτων ενυδρειοπονίας.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας καταδεικνύουν, ότι η αποδοτικότητα ενός συστήματος επηρεάζεται από τον ρυθμό απομάκρυνσης της αμμωνίας και κατ' επέκταση την ανάπτυξη των φυτών.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Bernstein, S. (2011). *Aquaponic gardening: a step-by-step guide to raising vegetables and fish together*. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.
- 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.
- Considine, M. (2007, Aug-Sept). Plant crops to clean up aquaculture waste. *ECOS Magazine*, p.34.
- Chen, S., Ling, J., Blancheton, J-P., (2006). Nitrification Kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, 34, 179-197.
- Diver, S (2000,). *Aquaponics - Integration of Hydroponics with Aquaculture. Horticulture Systems Guide – Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA)*, pp.1-20
- 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.
- 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. *Bioresource Technology*, 1511-1517
- Gichana, Z., Liti, D., Wakibia, J. *et al.* Efficiency of pumpkin (*Cucurbita pepo*), sweet wormwood (*Artemisia annua*) and amaranth (*Amaranthus dubius*) in removing nutrients from a smallscale recirculating aquaponic system. *Aquacult Int* 27, 1767–1786 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00442-x>
- Hughey, T. (2005). *Aquaponics for Developing Countries*. *Aquaponics Journal*, Issue 38, pp 16-18.
- Kamstra A., van der Heul JW and Nijhof M. 1998. Performance and optimization of trickling filter on eel farms. *Aquac. Eng* 17, 175-192.
- Liddicoat, M. I., Tibhitts, S., & Butler, E. I. (1975). *The determination of ammonia in seawater. Limnology and Oceanography*, 20(1), 131-132.



- Lennard. W. (2012). Aquaponics system design parameters: Basic system water chemistry. Aquaponic Solutions. Aquaponic Fact Sheet Series. Pp 90.
- 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
- Nelson, R.L (2008), Aquaponic Food Production – Raising fish and plants for food and profit. Montello, WI: Nelson and Pade, Inc.
- 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.
- Rakocy, J. E . (1988-89). Hydroponic Lettuce Production in a Recirculating Fish Culture System. Island Perspectives 3, pp. 5-10.
- 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 .
- 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>. Accessed 13 April 2019
- Spade, J. S. (2009). Village Aquaponics. Aquaponics Journal.
- Spotte S., (1992). Captive Seawater Fishes. John Wiley& Sons, New York. 942pp.
- Suits, B. (2010). Access to Personal Agriculture. The Aquaponics Guidebook, Volume 1, 2<sup>nd</sup> Edition . pp. 1-12.
- Tasiou K. (2019). The production process of sea bass in an aquaponic system. MSc thesis. Department of Ichthyology and Aquatic Environment, University of Thessaly, pp. 85.
- 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.

- Vlahos N., Hotos G, Kapetanios,N. (2004). The effect of temperature on the conditioning of filter bed in aquaria. 2<sup>nd</sup> 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., 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.
- Zar J. H. Biostatistical Analysis; Prentice-Hall: London,UK., (1999); P. 718.
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Guimbaud, C., Wang, Q., Fang, Y., 2016a. Effect of seasonal variation on nitrogen transformations in aquaponics of northern China. *Ecol. Eng.* 94, 30–36.

## 6.2 Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Βλάχος Ν. (2017). Ενυδρεία, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας Υδατοκαλλιεργιών. Τ.Ε.Ι. Δ. Ελλάδος, σελ. 77.
- Δεβετζόγλου Κ.(2021). Ανάπτυξη λαβρακιού και ρόκας σε σύστημα ενυδρειοπονίας. Προπτυχιακή Διπλωματική εργασία Τμήμα Ζωικής Παραγωγής, Αλιείας, Υδατοκαλλιεργειών.Πανεπιστήμιο Πατρών.σελ 50.
- Τάσιου., Κ. (2019). Παραγωγική διαδικασία του λαβρακιού σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας. Μεταπτυχιακή διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Σελ.85.