



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Σχεδιασμός, τεχνοτροπία κατασκευής και λειτουργικά
χαρακτηριστικά ενός συστήματος ενυδραιοπονίας με υφάλμυρο νερό»**

Καλλιόπη Γιαννουλάτου
Ειρήνη Μαρδόγλου

ΒΟΛΟΣ 2019

«Σχεδιασμός, τεχνοτροπία κατασκευής και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος ενυδρευσιμότητας με υφάλμυρο νερό»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

- 1. Νικόλαος Βλάχος,** Ε.ΔΙ.Π, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Φυσιολογία θρέψης διακοσμητικών ψαριών σε ενυδρεία, ***Επιβλέπων.***
- 2. Ελένη Μεντέ,** Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Φυσιολογία Υδρόβιων Ζωικών Οργανισμών, ***Μέλος.***
- 3. Βερίλλης Παναγιώτης,** Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μικροσκοπία και Ανάλυση Εικόνας στην Ιστολογία και στους Υδρόβιους Οργανισμούς, ***Μέλος.***

Στις οικογένειές μας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλαν στο να φέρουμε εις πέρας την παρούσα Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.

Ιδιαίτερα θα θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον κ Νικόλαο Βλάχο Επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής προπτυχιακής εργασίας.

Επίσης ευχαριστούμε την κ Ελένη Μεντέ καθηγήτρια και τον κ Παναγιώτη Βερίλη μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μας προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του Πειράματος και συγγραφής της παρούσης εργασίας.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειάς μας για τη στήριξή τους, τόσο κατά τη διάρκεια περάτωσης της εργασίας όσο και για τα εφόδια με τα οποία μας προμήθευσαν κατά τη διάρκεια της ζωής μας και όλους τους φίλους μας που στάθηκαν πλάι μας και μας βοήθησαν να φέρουμε εις πέρας αυτήν την εργασία.

我想非常感谢我的主管, Vlahos教授, 为他的宝贵帮助!

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενυδρειοπονία είναι μια βιώσιμη μέθοδος παράλληλης εκτροφής ψαριών και καλλιέργειας φυτών σε ένα κλειστό σύστημα ανακυκλούμενου νερού (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) για την παραγωγή βιολογικών προϊόντων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής, προπτυχιακής, εργασίας, ήταν η μελέτη και η εκτέλεση του σχεδιασμού, της τεχνοτροπίας κατασκευής και των λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός συστήματος ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό για την συγκαλλιέργεια τσιπούρας (*Sparus aurata*) και κρίταμου (*Chrithmum maritimum*). Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν και ρυθμίστηκαν έξι συστήματα ενυδρειοπονίας εργαστηριακής κλίμακας και πληρώθηκαν με υφάλμυρο νερό δύο διαφορετικών αλατοτήτων 8 ppt και 20 ppt ανά 3 συστήματα. Για το κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα κατασκευάστηκε ένα ενυδρείο (60,5 x 30,5 x 30 cm) ωφέλιμου όγκου 55 L για την εκτροφή των ψαριών (FT) και την καλλιέργεια των φυτών (GB) αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο τύπου sump (34 x 26 x 35 cm) ωφέλιμου όγκου 30 L για κάθε σύστημα που αποτελούταν από 3 μέρη το μηχανικό φίλτρο, το βιολογικό (K1, κεραμικό υλικό, βιόσφαιρες) και την αντλία. Όλα τα συστήματα είχαν συνεχή ροή νερού με σταθερή παροχή 1496 cm³/min και ταχύτητα φιλτραρίσματος 2,24 cm/min και σταθερή ροή αέρα 1,8 L/min στα GB και 0,22 L/min στα FT.

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι ο κύκλος του αζώτου ολοκληρώθηκε την 35^η ημέρα υποδηλώνοντας τη ρύθμιση των συστημάτων, την οποία έγινε και η έναρξη του διατροφικού πειράματος με προσθήκη των ψαριών και φυτών. Υπολογίστηκε η οξειδωτική ικανότητα των φίλτρων στα 0,54 mg O₂/L και το φορτίο

ρύπανσης των συστημάτων στα 0,3 mg O₂/L και το ήμισυ βάθος (λειτουργικό βάθος) υπολογίστηκε στα 22 cm για την αλατότητα των 8 ppt και στα 11 cm για την αλατότητα των 20 ppt αντίστοιχα. Συμπερασματικά, ο ιδανικός αριθμός ψαριών για την ισορροπία του κάθε συστήματος ήταν 26.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδρειοπονία, Κλειστά συστήματα εκτροφής, Σχεδιασμός, Τεχνοτροπία κατασκευής, Ρύθμιση

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Εισαγωγή στην ενυδραιοπονία	1
1.2 Σχεδιασμός συστημάτων.....	2
1.3 Ρύθμιση συστημάτων	5
1.4 Σκοπός του πειράματος.....	7
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	8
2.1 Προμήθεια ατόμων τσιπούρας (<i>Sparus aurata</i>) και φυτών κρίταμου (<i>Crithmum maritimum</i>).....	8
2.2. Σχεδιασμός – κατασκευή ενυδραιοπονικού συστήματος με υφάλμυρο νερό	9
2.3 Συνθήκες εκτροφής - Σύστημα εκτροφής.....	15
2.4 Ρύθμιση συστημάτων ενυδραιοπονίας.....	19
2.5 Σιτηρέσιο και χορήγηση τροφής	21
2.6 Μετρήσεις μορφομετρικών χαρακτηριστικών	21
2.7 Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων	22
2.8 Προσδιορισμός ολικής αμμωνίας-αζώτου (T.A.N.).....	23
2.9 Προσδιορισμός νιτρικών ιόντων (NO_2^-).....	24
2.10 Προσδιορισμός νιτρικών ιόντων (NO_3^-)	25
2.11 Υπολογισμοί τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών συστημάτων ενυδραιοπονίας	26
2.11.1 Ρύθμιση Βιολογικού Φίλτρου.....	26
2.11.2 Οξειδωτική Ικανότητα Φίλτρου.....	28
2.11.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά βιολογικού φίλτρου	32
2.12 Πρόγραμμα διαχείρισης	33
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	35
3.1 Ρύθμιση συστήματος	35

3.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού.....	36
3.3 Οξειδωτική ικανότητα φίλτρου.....	40
3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά φίλτρου.....	44
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	45
4.1 Συζήτηση.....	45
4.2. Συμπεράσματα.....	47
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48
5.1 ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48
5.2 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
5.3 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	51
6. ABSTRACT.....	52
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	53

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στην ενυδραιοπονία

Η ενυδραιοπονία είναι μια τεχνική συνδυασμού της συμβατικής υδατοκαλλιέργειας (εκτροφή υδρόβιων ζώων όπως ψάρια, καρκινοειδή, μαλάκια σε δεξαμενές) και της υδροπονίας (καλλιέργεια φυτών σε νερό, χωρίς χώμα) σε ένα (οικο)σύστημα ανακυκλούμενου νερού (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) που χρησιμοποιεί φυσικούς βακτηριακούς κύκλους για τη μετατροπή των αποβλήτων των ψαριών σε διατροφή των φυτών (Somerville et al. 2014, Ragnheidur et al. 2015).

Ουσιαστικά, αποτελεί ένα είδος συνεργασίας μεταξύ ψαριών και φυτών και αξιοποιεί τις καλύτερες ιδιότητες της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, χωρίς να χρειάζεται να απορρίψει οποιοδήποτε νερό ή να προσθέσει χημικά λιπάσματα κάνοντας τη μία βιώσιμη μέθοδο παραγωγής οργανικών τροφίμων, χωρίς τη χρήση λιπασμάτων. Η ενυδραιοπονία προωθεί ένα πρωτοποριακό σύστημα παραγωγής ως επίλυση στις πιθανές περιβαλλοντικές επιβάρυνσης της ιχθυοκαλλιέργειας, στην εξάντληση των αποθεμάτων πόσιμου νερού, στην μείωση γονιμότητας των εδαφών και στη βιοποικιλότητα (Fronte et al. 2016).

Η ενυδραιοπονία γλυκού νερού είναι η πιο διαδεδομένη και μελετημένη τεχνική παραγωγής τροφίμων με οικολογικό τρόπο. Σύμφωνα όμως με τους Waller et al. (2013), η πιο καινοτόμος και με μεγάλο ενδιαφέρον στρατηγική σε αυτόν τον τομέα είναι η ενυδραιοπονία θαλασσινού νερού, όπου καλλιεργούνται είδη ευρύαλων ψαριών και αλόφυλων. Μεταξύ των ευρύαλων ειδών με μεγάλη προοπτική για ενυδραιοπονία θαλασσινού νερού είναι το λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) και η τσιπούρα (*Sparus*

aurata). Τα κύρια αλόφυτα είδη που καλλιεργούνται για την παραγωγή λαχανικών είναι το κρίταμο (*Chrithmum maritimum*), η αλμύρα (*Salsola soda*) και αρκετά είδη του γένους *Salicornia*, ενώ άλλα καλλιεργούνται για παραγωγή σιτηρών όπως η quinoa (Waller et al. 2015).

1.2 Σχεδιασμός συστημάτων

Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι ίσως ένα από τα βασικότερα βήματα για ένα επιτυχημένο σύστημα ενυδρειοπονίας. Υπάρχει μια πληθώρα παραγόντων που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν στο σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος τόσο περιβαλλοντικοί (η σταθερότητα του εδάφους, το ηλιακό φως, η θερμοκρασία, η σκίαση, η βροχή, η έκθεση στον αέρα), όσο και βιολογικοί (μέγεθος ψαριών, ηλικία, βακτήρια στο φίλτρο κτλ.) (Somerville et al. 2014).

Το πρώτο βήμα που θα πρέπει να επιτευχθεί είναι η τοποθεσία του συστήματος, καθώς υπάρχουν πολλές παράμετροι, όπως η σταθερότητα του εδάφους, το ηλιακό φως, η θερμοκρασία, η σκίαση, η βροχή, η έκθεση στον αέρα κ.ά.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι μεθόδων ενυδρειοπονίας (<https://aquaponics.com/methods-of-aquaponics/>):

- **Μέθοδος media bed**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο μια δεξαμενή γεμίζεται με κάποιο υλικό μέσο για τα φυτά, η οποία είναι γεμάτη με νερό από το ενυδρείο των ψαριών, και ανακυκλώνεται συνεχώς.

- **Μέθοδος τεχνικής θρεπτικού φιλμ (Nutrient Film Technique - NFT)**

Πρόκειται για μια μέθοδο στην οποία τα φυτά αναπτύσσονται σε μακριά,

φαρδιά κανάλια. Ένα λεπτό στρώμα νερού ρέει συνεχώς σε κάθε κανάλι και τροφοδοτεί τα φυτά με νερό, θρεπτικά συστατικά και οξυγόνο.

- **Μέθοδος καλλιέργειας βαθέως νερού (Deep Water Culture - DWC),** γνωστή και ως μέθοδος σχεδίας ή πλωτό σύστημα που είναι και εκείνη η οποία επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα. Τα φυτά, μεγαλώνουν πάνω σε σανίδες πολυεστέρα που επιπλέουν στο νερό. Συνήθως τα φυτά βρίσκονται σε ξεχωριστή δεξαμενή από τα ψάρια για να αποφευχθεί ο τραυματισμός των ριζών από αυτά.

Ένα ακόμη σημαντικό βήμα είναι η επιλογή του τύπου δεξαμενής, όπου θα φιλοξενηθούν οι υδρόβιοι οργανισμοί και ο οποίος εξαρτάται από τις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά των ειδών. Το σχήμα της δεξαμενής επηρεάζει σημαντικά την κυκλοφορία του νερού. Το χρώμα της θα πρέπει να είναι διαφανές, λευκό ή γενικότερο ανοιχτόχρωμο, ώστε να είναι εύκολη η παρατήρηση των οργανισμών και η ποσότητα των αποβλήτων στο κάτω μέρος της δεξαμενής (Lekang 2007).

Όσο αφορά το σχήμα οι δεξαμενές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις ορθογώνιες (raceways) ή γραμμικού τύπου και τις στρόγγυλες ή περιστρεφόμενου τύπου. Η κάθε κατηγορία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της που βασίζονται κυρίως στην κυκλοφορία του νερού (Χώτος 2007, Somerville et al. 2014).

Οι ορθογώνιες δεξαμενές έχουν νηματική ροή νερού (plug flow) με αποτέλεσμα την κλιμάκωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του νερού από την είσοδο έως την έξοδο και την εύκολη καθίζηση αιωρούμενων στερεών. Για να αποφευχθεί αυτό, ο τύπος αυτής της δεξαμενής απαιτεί ανακύκλωση νερού τουλάχιστον 4 φορές/ ώρα και ταχύτητα ροής 0,033 m/s. Αν χρησιμοποιούνται στόμια-βάνες για την είσοδο ή έξοδο του νερού πρέπει να δοθεί προσοχή στα «νεκρά σημεία» που δημιουργούνται.

Οι στρόγγυλες δεξαμενές έχουν ακτινική ροή (radial flow) με αποτέλεσμα να υπάρχουν ομοιόμορφα χαρακτηριστικά νερού και να μεταφέρονται τα στερεά απόβλητα προς το κέντρο της δεξαμενής. Η ταχύτητα αντιθέτως είναι ανομοιόμορφη σε κάθε σημείο της δεξαμενής (μέγιστη στην περιφέρεια – μέτρια στην απορροή – ελάχιστη στο κέντρο) και η είσοδος του νερού που βρίσκεται σε κάποιο περιφερειακό σημείο είναι υπό πίεση. Σε αυτόν τον τύπο δεξαμενών προσοχή πρέπει να δοθεί στη δακτυλιοειδή «νεκρή ζώνη» που δημιουργείται στο κέντρο λόγω φτωχής κυκλοφορίας.

Οι δεξαμενές συνιστάται να κατασκευάζονται είτε από κάποιο ισχυρό αδρανές πλαστικό ή fiberglass λόγω της ανθεκτικότητάς τους, της μεγάλης διάρκειας ζωής και το ότι είναι αρκετά ελαφριά και ευκίνητα και να στεγανοποιούνται με ειδική σιλικόνη ενυδρείων στις ενώσεις. Το χρώμα τους θα πρέπει να είναι διαφανές, λευκό ή γενικότερο ανοιχτόχρωμο, ώστε να είναι εύκολη η παρατήρηση των οργανισμών και η ποσότητα των αποβλήτων στον πυθμένα (Lekang 2007).

Η δεξαμενή πρέπει να είναι καλυμμένη τόσο για την παρεμπόδιση των πτώσεων των ψαριών από άλματα και την είσοδο ξένων σωμάτων, όσο και για την παροχή σκίασης για την παρεμπόδιση ανάπτυξη φυκιών.

Η συνδεσμολογία των δεξαμενών των οργανισμών, των φυτών και του φίλτρου γίνεται με τη χρήση σωλήνων PVC, συνδέσεων από PVC και εξαρτημάτων, εύκαμπτων σωλήνων και λάστιχων. Για την ολοκλήρωση του συστήματος χρησιμοποιούνται και ταινία Teflon, ειδική σιλικόνη στεγανωτική για ενυδρεία και βαλβίδες αέρα. Οι σωληνώσεις πρέπει να είναι ποιοτικώς κατάλληλες για τρόφιμα για την αποφυγή διαρροής χημικών στοιχείων στο νερό και να είναι σκούρου χρώματος ή

αδιαφανείς, σε αντίθεση με τη δεξαμενή, για την αποφυγή ανάπτυξης των φυκιών (Somerville et al. 2014).

1.3 Ρύθμιση συστημάτων

Η ρύθμιση των συστημάτων της ενυδρειοπονίας είναι το αρχικό βήμα στην έναρξη λειτουργίας του συστήματος. Αρχικά, πρέπει να εξασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες στο νερό (θερμοκρασία, pH, αλατότητα, παροχή κτλ.), ώστε το σύστημα να υποδεχθεί τα ψάρια και έπειτα από κάποιο διάστημα προσαρμογής και τα φυτά. Η παραγωγή ξεκινά, αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της ρύθμισης, η προσαρμογή, δηλαδή, των βακτηρίων, ψαριών και φυτών. Μη ορθή ρύθμιση έχει ως αποτέλεσμα ένα ασταθές σύστημα, όπου οι συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν, προκαλώντας τη θανάτωση ενός από τους οργανισμούς που λαμβάνουν μέρος και άρα την κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος.

Η παροχή του νερού είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες, καθώς επηρεάζει την επαφή με το νερό των βακτηρίων και των ριζών των φυτών, όπως και την μεταφορά των στοιχείων από τη μια δεξαμενή στην άλλη, τα οποία επηρεάζουν με τη σειρά τους την άμεση απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά και την μετατροπή των στοιχείων από τα βακτήρια (Wahyuningsih et al. 2015). Υπάρχουν δύο ήδη ροής, η συνεχής και η διακοπτόμενη. Στην πρώτη, το ίδιο νερό παραμένει στις δεξαμενές για περισσότερη ώρα προκαλώντας αύξηση του χρόνου επαφής με τις ρίζες των φυτών και τα βακτήρια, αλλά με κίνδυνο μείωσης επιπέδων οξυγόνου και παροχής θρεπτικών συστατικών. Η διακοπτόμενη ροή χαρακτηρίζεται από τις φάσεις κατακλυσμού και αποστράγγισης των δεξαμενών των φυτών, δημιουργώντας

ομοιομορφία στην κατανομή των θρεπτικών κατά τη διάρκεια της φάσης κατακλυσμού και βελτιώνει τον αερισμό στη φάση της αποστράγγισης (McMurty et al. 1997).

Ο κύκλος του αζώτου είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Η αμμωνία που παράγεται για τα ψάρια είναι τοξική για τα φυτά ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως και τα νιτρώδη. Για την αξιοποίησή τους χρησιμοποιείται ένα βιολογικό φίλτρο με βακτήρια που μετατρέπει τα συστατικά αυτά σε νιτρικά, απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Ο ελάχιστος όγκος αυτού του δοχείου βιολογικού φίλτρου πρέπει να είναι το ένα έκτο από αυτόν της δεξαμενής ψαριών (Somerville et al. 2014).

Σημαντική για το σύστημα είναι και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO), η οποία πρέπει να είναι υψηλή για την εξασφάλιση της ομαλής ανάπτυξης των οργανισμών, των φυτών, αλλά και των βακτηρίων του βιολογικού φίλτρου. Αντλίες αέρα εισάγουν αέρα στο νερό μέσω σωληνώσεων και αερόπετρων στο εσωτερικό των δεξαμενών.

Το pH είναι μια παράμετρος, η οποία αν και σημαντική για τα βακτήρια, είναι προτιμότερο να ρυθμίζεται με βάση τα φυτά και τα ψάρια. Οι ιδανικότερες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 6-8 δεδομένου ότι συμπεριλαμβάνονται και τα υφάλμυρα συστήματα, καθώς τόσο τα φυτά, όσο και τα ψάρια παρουσιάζουν συγκεκριμένες απαιτήσεις, σε αντίθεση με τα βακτήρια που είναι πιο προσαρμοστικά στις μεταβολές pH και προσαρμόζονται εύκολα (Somerville et al. 2014).

Η θερμοκρασία του νερού ρυθμίζεται ανάλογα με το είδος των ψαριών, αλλά πρέπει να δοθεί και αρκετή προσοχή στα βακτήρια. Η ιδανική θερμοκρασία για την ανάπτυξη και παραγωγικότητα των βακτηρίων κυμαίνεται μεταξύ 17-34 °C. Εάν η θερμοκρασία μειωθεί κάτω από 17 °C, παρατηρείται μείωση της παραγωγικότητας, ενώ

κάτω από 10 °C η παραγωγικότητα μειώνεται κατά 50% ή περισσότερο (Vlahos et al 2004).

Τέλος, πρέπει να υπολογιστεί και ο αριθμός των ψαριών σε κάθε δεξαμενή, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος τόσο της δεξαμενής, όσο και του φίλτρου, το είδος των ψαριών και το μέγεθός τους, αλλά και ο αριθμός των φυτών που αντίστοιχα εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής τους, το είδος τους, αλλά και την απόσταση μεταξύ τους. Υπερφόρτωση του συστήματος μπορεί να σημαίνει θανάτωση οργανισμών, μειωμένη παραγωγικότητα από τα βακτήρια και άρα μη ομαλή λειτουργία του συστήματος (Spotte 1992).

1.4 Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής προπτυχιακής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η ρύθμιση ενός συστήματος ενυδρείοπονίας μικρής κλίμακας (εργαστηριακής) με υφάλμυρο νερό, προκειμένου να οδηγήσει στην βέλτιστη ανάπτυξη ψαριών και φυτών.

Για την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων επιλέχθηκε η μέθοδος της «σχεδίας» (raft), ενώ χρησιμοποιήθηκαν τσιπούρες (*Sparus aurata*) και κρίταμο (*Chrothmum maritimum*).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Προμήθεια ατόμων τσιπούρας (*Sparus aurata*) και φυτών κρίταμου (*Crithmum maritimum*)

Το πείραμα διεξήχθη στο τολ Ενυδρειοπονίας του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών στο Βόλο.

Για να ρυθμιστούν τα συστήματα, χρησιμοποιήθηκαν τσιπούρες που προμηθεύτηκαν από τον Ιχθυογεννητικό σταθμό εταιρείας Ιχθυοτροφεία ΣΕΛΟΝΤΑ ΑΕΓΕ με έδρα στην Ναύπακτο Αιτωλοακαρνανίας και μεταφέρθηκαν σε ειδικά πλαστικά δοχεία μεταφοράς στο εργαστήριο.

Τα ψάρια διαμοιράσθηκαν σε τρία ενυδρεία διαστάσεων 50 x 50 x 50 cm και συνολικού όγκου 125 L σε αλατότητα 25 ppt και θερμοκρασία 23°C με σκοπό τον εγκλιματισμό τους για διάστημα 20 ημερών σε εργαστηριακές συνθήκες αιχμαλωσίας. Κατά τη διάρκεια της προσαρμογής των ψαριών στις δύο διαφορετικές αλατότητες 8 ppt και 20 ppt αντίστοιχα, η αλατότητα μειωνόταν σταδιακά για χρονικό διάστημα 28 ημερών, ώστε να προσαρμοστούν στις πειραματικές συνθήκες εκτροφής και πριν προστεθούν τα φυτά στα συστήματα ενυδρειοπονίας. Για τη διαδικασία της ρύθμισης συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 156 άτομα τσιπούρας και 36 φυτάρια κρίταμου (*Crithmum maritimum*). Ο πειραματικός σχεδιασμός, η υλοποίηση και η έναρξη λειτουργίας των συστημάτων ενυδρειοπονίας μέχρι και τη ρύθμιση τους διήρκησε 40 ημέρες ενώ η διάρκεια της εκτροφής ήταν 75 ημέρες

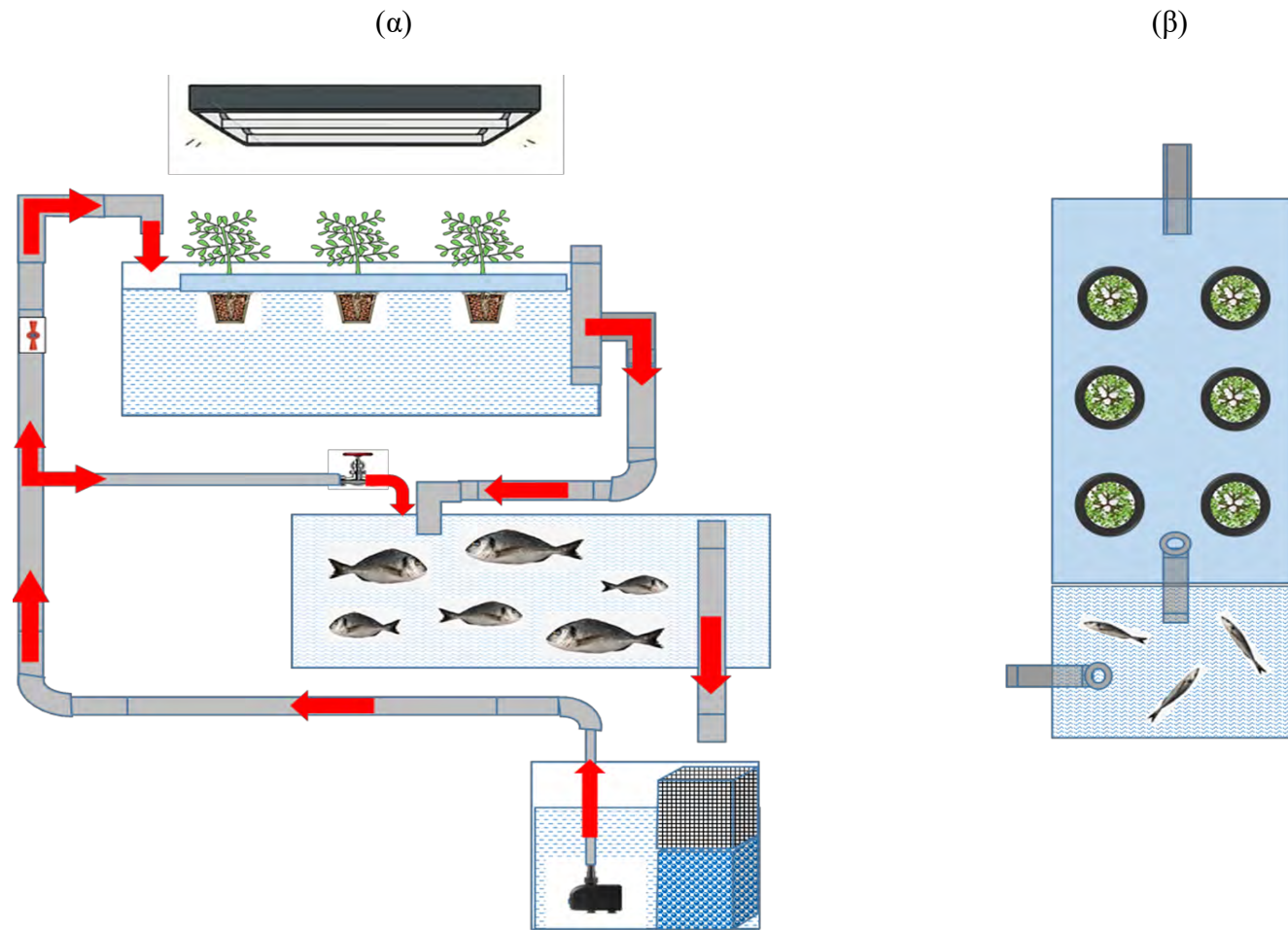
2.2. Σχεδιασμός – κατασκευή ενυδρειοπονικού συστήματος με υφάλμυρο νερό

Προκειμένου να μελετηθεί η ανάπτυξη της τσιπούρας και του κρίταμου στα σύστημα ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό σε δυο διαφορετικές αλατότητες 8 ppt και 20 ppt αντίστοιχα, σχεδιάστηκαν (Σχ.1) και κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά έξι αυτόνομα ενυδρειοπονικά συστήματα με τα αντίγραφα τους. Το κάθε σύστημα αποτελούνταν από ένα υάλινο ενυδρείο για τα φυτά (growbed), ένα ενυδρείο εκτροφής ψαριών και ένα βιολογικό φίλτρο τύπου sump.

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν δυο μεταλλικοί πάγκοι διαστάσεων 40 x 40 x 2 cm, εκ των οποίων ο πρώτος πάγκος είχε διαστάσεις 220 x 50 x 70 cm επάνω στον οποίο τοποθετήθηκαν τα ενυδρεία εκτροφής των ψαριών ενώ στο δεύτερο πάγκο τοποθετήθηκαν τα growbed των φυτών και είχε διαστάσεις 190 x 60 x 120 cm (Εικ. 1).



Εικόνα 1. Διάταξη συστημάτων ενυδρειοπονίας στους πάγκους (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Σχήμα 1. (α) Πλάγια όψη με ροή νερού και (β) Κάτοψη συστήματος Ενυδρείων σε Κλίμακα: 1:10. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Οι δύο πάγκοι τοποθετήθηκαν σε παράλληλη διάταξη επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο το νερό του συστήματος να ρέει διαμέσου της βαρύτητας από το growbed των φυτών προς τη δεξαμενή των ψαριών και από εκεί με τη σειρά του στο φίλτρο τύπου sump (Σχ.1) (Somerville et al. 2014).

Η διάταξη ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση φωτιστικών (Sylvania Grolux SHP-TS, HPS lights, 400W) όπου προσαρμόστηκαν και βιδώθηκαν μεταλλικά ντέξιον δημιουργώντας ένα σχήμα Π επάνω στο οποίο στερεώθηκαν οι μετασχηματιστές και οι ανακλαστήρες των φωτιστικών (Εικ.2).



Εικόνα 2. Διάταξη φωτιστικού στο ενυδρειοπονικό σύστημα (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα ήταν πλαστικοί τύπου Vaisir με διαμέτρημα $\Phi 32$ mm (Πιν.1) (Εικ.3).

Πίνακας 1. Σωληνώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ενυδρειοπονικών συστημάτων

Ενυδρεία	Απορροές	Σωλήνας(διαστάσεις)	Γωνίες	Σύνδεσμος σωλήνας τύπου T
ST1	Φίλτρο- FT	51cm&30cm	2×45°&1×90°	1
	FT-GB	51cm	-	-
	GB-FT	40cm&26cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	55cm	1×90°	-
ST2	Φίλτρο- FT	85cm&20cm	2×45°& 2×90°	1
	FT-GB	44cm&28cm	-	-
	GB-FT	37cm&26cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	55cm	1×45°	-
ST3	Φίλτρο- FT	90cm&28cm	-	-
	FT-GB	56cm&32cm	-	-
	GB-FT	35cm&29cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	55cm	3×45°& 2×90°	1
ST4	Φίλτρο- FT	105cm	2×45°& 3×90°	1
	FT-GB	26cm&80cm&30cm	-	-
	GB-FT	35cm&29cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	55cm	1×45°	-
ST5	Φίλτρο- FT	90cm&35cm	2×45°& 3×90°	1
	FT-GB	56cm&29cm	3×90°	-
	GB-FT	37cm&29cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	55cm	1×45°	-
ST6	Φίλτρο- FT	30cm&54cm	2×45°& 3×90°	1
	FT-GB	45cm&41cm	-	-
	GB-FT	35cm&29cm	3×90°	-
	FT-φίλτρο	50cm&30cm	2×90°	-



Εικόνα 3. Σωληνώσεις, γωνίες, ταφ, μούφα Φ32 (τύπου Valsir) που χρησιμοποιήθηκαν για τη συνδεσμολογία των σωληνώσεων των ενυδρειοπνικών συστημάτων και την κατασκευή του συστήματος απορροής (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Η συνδεσμολογία των σωληνώσεων περιγράφεται και αναλύεται στη συνέχεια και περιλαμβάνει τις εξής φάσεις:

1. Συνδεσμολογία από φίλτρο σε growbed.

Για την κατασκευή των αυτόνομων ενυδρειοπνικών συστημάτων, χρειάστηκαν 12 PVC σωλήνες τύπου Valsir Φ32 mm οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση των growbed με τα ενυδρεία των ψαριών και είχαν μέσο μήκος 36,5 cm και 28 cm. Οι σωλήνες αυτού του τύπου συνδέθηκαν με τρεις γωνίες τύπου Valsir 90°. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα 12 πλαστικοί σωλήνες μήκους 55 cm οι οποίες στην απόληξή τους ήταν συνδεδεμένες με γωνίες τύπου Valsir 45°, προκειμένου το νερό να απορρέει στο βιολογικό φίλτρο τύπου sump.

2. Σύστημα απορροής (σύνδεση growbed με ενυδρεία)

Η σύνδεση και η τροφοδοσία του ενυδρείου των ψαριών (FT) με τα φυτά (growbed) πραγματοποιήθηκε διαμέσου πλαστικού σωλήνα σχήματος «T» το οποίο δημιουργούσε ένα σιφόνιο απορροής του νερού. Επίσης για την ολοκλήρωση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν PVC σωλήνες τύπου Valsir μέσου μήκους 14 cm. Συνολικά για την κατασκευή του συστήματος απορροής χρησιμοποιήθηκαν 12 σωλήνες τύπου Valsir μέσου μήκους 51 cm και 12 σωλήνες μέσου μήκους 34,5 cm. Τέλος, για τη ρύθμιση των ροών και των παροχών χρησιμοποιήθηκαν πλαστικά ρακόρ διαμέτρου Φ20 που συνδέθηκαν με μαστό τύπου Valsir Φ32/Φ20 στον οποίο συνδέθηκε πλαστικός σωλήνας άρδευσης μήκους 10 περίπου cm και μέσου διαμετρήματος Φ18 cm (Εικ. 4).

3. Συνδεσμολογία από φίλτρο σε ενυδρεία

Για τη σύνδεση και την τροφοδοσία του ενυδρείου με νερό από το φίλτρο (τμήμα αντλίας) χρησιμοποιήθηκαν γωνίες 45° τύπου Valsir οι οποίες ήταν συνδεδεμένες με την αντλία-βυθού. Το μήκος του συνολικού σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 75 cm ενώ η απόληξή του κατέληγε σε πλαστική γωνία 45°. Η τροφοδοσία του ενυδρείου με το νερό έγινε με τη χρήση σωλήνα μέσου μήκους 27 cm που συνδέθηκε με γωνία 90°.



Εικόνα 4. Συνδεσμολογία πλαστικών ρακόρ που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση της παροχής στο σύστημα ενυδρείοπονίας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

2.3 Συνθήκες εκτροφής - Σύστημα εκτροφής

Όπως αναφέρθηκε, για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά συνολικά έξι αυτόνομα ενυδρείοπονικά συστήματα με τα αντίγραφα τους τα οποία χωρίστηκαν ανά τρία σε δυο διαφορετικές μεταχειρίσεις. Ο διαχωρισμός έγινε με κριτήριο την αλατότητα που ήταν 8 ppt και 20 ppt, αντίστοιχα.

Συνολικά στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 156 άτομα *S. aurata* μέσου βάρους $2,55 \pm 0,01$ g και μέσο ατομικό μήκος $5,65 \pm 0,01$ cm, οι οποίες διαμοιράστηκαν στα έξι αυτόνομα ενυδρείοπονικά συστήματα ανά 26 άτομα και στις δυο διαφορετικές μεταχειρίσεις.

Το κάθε ενυδρείοπονικό σύστημα αποτελούνταν από το ενυδρείο των ψαριών (FT) ωφέλιμου όγκου 55 L, το ενυδρείο των φυτών (growbed), ωφέλιμου όγκου 55 L,

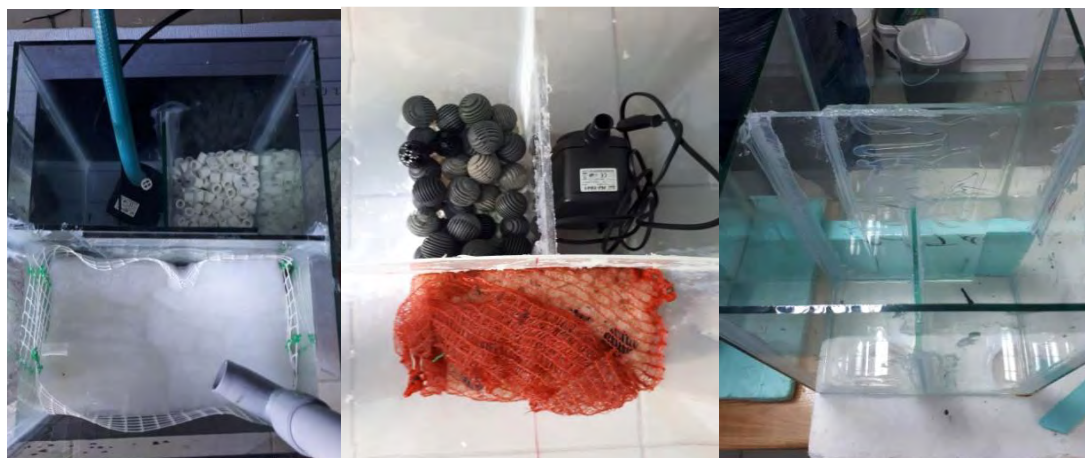
τύπου raft (τα φυτά τοποθετημένα σε φελιζόλ με τις ρίζες τους να είναι βυθιζόμενες στο νερό) και ένα φίλτρο τύπου sump ωφέλιμου όγκου 30 L (Εικ.5).

Τα ενυδρεία όπως και τα growbed κατασκευάστηκαν από γυαλί πάχους 5 cm με διαστάσεις 60,5 x 30,5 x 30 cm και κολλήθηκαν με ειδική σιλικόνη ενυδρείων. Τα φίλτρα κατασκευάστηκαν και αυτά από γυαλί πάχους 5 cm με διαστάσεις 34 x 26 x 35 cm και χωρίστηκαν σε τρία τμήματα με επιφάνεια 455 cm², 214,5 cm² και 214,5 cm² αντίστοιχα για το μηχανικό, το βιολογικό και το reservoir tank αντίστοιχα. Στο μηχανικό φίλτρο κατασκευάστηκαν από πλαστική σήτα με άνοιγμα ματιού 10 mm διάτρητα καλάθια σχήματος παραλληλόγραμμου και τοποθετήθηκαν 2-3 κομμάτια υαλοβάμβακα.



Εικόνα 5. Αυτόνομα συστήματα ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

Το βιολογικό φίλτρο τύπου trickling κάλυπτε το μεγαλύτερο τμήμα του φίλτρου στο οποίο τοποθετήθηκαν τρία ισόποσα διαφορετικά είδη βιολογικού υλικού (Κ1, μακαρόνι και βιόσφαιρες) (Εικ.6). Τέλος, το τρίτο μέρος του φίλτρου το reservoir tank, τοποθετήθηκαν βυθιζόμενες αντλίες με παροχή 1800 L/h (SUNSUN, HJ-1841 multi-function submersible pump, 40W) για να διοχετεύουν το καθαρό νερό κατά 10% στο ενυδρείο των ψαριών (FT) και το υπόλοιπο 90% στο ενυδρείο των φυτών (GB). Επίσης, κατασκευάστηκαν καπάκια από φελιζόλ ώστε να καλύψουν τα ενυδρεία των ψαριών και από πολυκαρβονικό υλικό για να καλύψουν τα φίλτρα προκειμένου να περιοριστεί η εξάτμιση του νερού.



Εικόνα 6. Βιολογικό φίλτρο των αυτόνομων συστήματα ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Η ροή του νερού (Πιν.2) στο σύστημα ήταν συνεχής δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό σταθερή παροχή η οποία ρυθμίστηκε να είναι ίση με $1496 \text{ cm}^3/\text{min}$ επιτυγχάνοντας ταχύτητα φιλτραρίσματος $2,24 \text{ cm}/\text{min}$ ή οποία ρυθμίστηκε να είναι σταθερή σε όλα τα συστήματα.

Πίνακας 2. Ροή νερού και αέρα στα ενυδρεία των φυτών (GB) και στα ενυδρεία των ψαριών (FT) (εκφρασμένα σε cm³/sec, L/min)

ΕΝΥΔΡΕΙΑ	GB (cm³/sec)	FT (cm³/sec)	GB (L/min)	FT (L/min)
1	30	3,7	1,8	0,22
2	30	3,7	1,8	0,22
3	30	3,7	1,8	0,22
4	30	3,7	1,8	0,22
5	30	3,7	1,8	0,22
6	30	3,7	1,8	0,22

Η παροχή του αέρα στα ενυδρεία ψαριών και φυτών διασφαλίστηκε με την προσθήκη αεραντλιών (Dolphin Mouse M-104, 2,7 W) οι οποίες διοχέτευαν ατμοσφαιρικό οξυγόνο διαμέσου μια πέτρας παρόλιθου (αερόπετρας) διαστάσεων 12 x 25 mm ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη διάχυση του αέρα στο νερό τόσο της δεξαμενής ανάπτυξης των ψαριών όσο και στο growbed. Η ροή του αέρα ρυθμίστηκε στα 1,8 L/min στα growbed και στα 0,22 L/min στις δεξαμενές των ψαριών. Τέλος, η θερμοκρασία του νερού, διατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος στους 23°C και ήταν αυτή του περιβάλλοντος χώρου του εργαστηρίου.

Στα ενυδρεία υδροπονικής καλλιέργειας των φυτών εφαρμόστηκε η μέθοδος της σχεδίας (raft) χρησιμοποιήθηκαν πολυεστερικές σχεδίες από φελιζόλ δημιουργώντας καλλιεργητική επιφάνεια 1845,25 cm² στις οποίες έγιναν 6 οπές διατομής 5,5 cm και απόστασης 8 cm η μία από την άλλη. Στις οπές τοποθετήθηκαν ειδικά πλαστικά φυτοδοχεία υδροπονίας (net pots) τα οποία πληρώθηκαν με άργιλο ώστε να συγκρατεί τις ρίζες των φυτών (Εικ.7).



Εικόνα 7. Growbed των αυτόνομων συστημάτων ενυδρειοπονίας με υφάλμυρο νερό που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία (Πηγή: Προσωπικό αρχείο).

Ο φωτισμός στα φυτά γινόταν με λυχνίες ατμών νατρίου (Sylvania GroLux SHP-TS, HPS lights, 400W) οι οποίες τοποθετήθηκαν σε ειδικούς ανακλαστήρες (Watermark Stuco Reflector). Η φωτοπερίοδος ρυθμίστηκε να είναι 14 ώρες φως και 10 ώρες σκοτάδι.

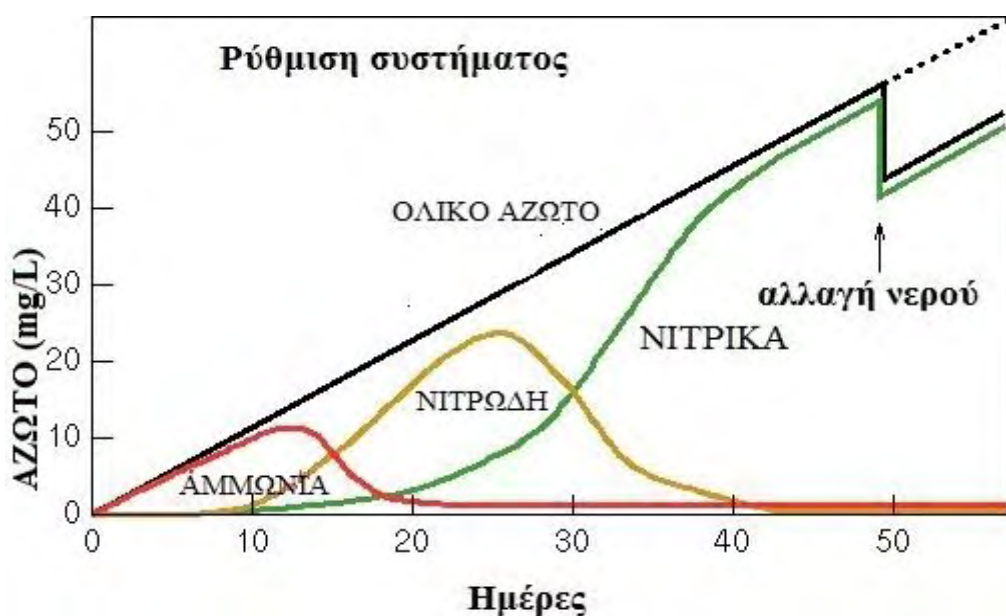
2.4 Ρύθμιση συστημάτων ενυδρειοπονίας

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 ενυδρείοποιίας επιτεύχθηκε διαμέσου της μεθοδολογίας που περιγράφεται από τους Vlahos et al. (2004), Βλάχος (2014) και Vlahos et al. (2016). 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 NH_4Cl ως πηγή αμμωνίας (Vlahos et al. 2004). Δύο φορές την εβδομάδα πραγματοποιούνταν μετρήσεις της ολικής αμμωνίας (Total Ammonium Nitrogen, T.A.N), των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-), των νιτρικών ιόντων (NO_3^-), του pH και του οξυγόνου, ώστε το σύστημα να ρυθμιστεί (Εικ.8).



Εικόνα 8. Διάγραμμα ρύθμισης βιολογικού φίλτρου ενός ενυδρείου (Πηγή: Spotte (1992), όπως τροποποιήθηκε από Βλάχο (2017)).

2.5 Σιτηρέσιο και χορήγηση τροφής

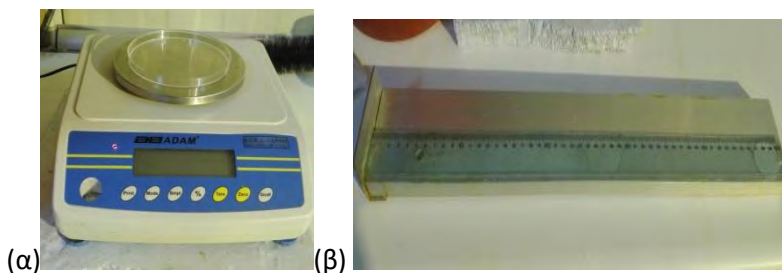
Το σύστημα ενυδρειοπονίας βασίζεται στην αρμονική συμβίωση ψαριών με φυτών. Τα φυτά χρειάζονται τα νιτρικά ιόντα για να αυξηθούν ομαλά, τα οποία προέρχονται από τη μετατροπή της αμμωνίας που παράγουν τα ψάρια με τη βοήθεια βακτηρίων.

Επομένως είναι εμφανές πως χρειάζεται μια ικανοποιητική ποσότητα αμμωνίας και αυτό εξασφαλιζόταν με χορήγηση σιτηρεσίου τρεις φορές την ημέρα ώστε το σύστημα να είναι σε απόλυτη αρμονία και επιτυγχανόταν η ομαλή ανάπτυξη ψαριών και φυτών.

Η τροφή που χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ήταν εμπορικά σύμπηκτα (προμηθευτήκαν από τη BIOMAR). Κάθε δεκαπέντε ημέρες γίνονταν καταμέτρηση του ολικού βάρους και ολικού μήκους σώματος των ατόμων τσιπούρας και ανάλογα με την αύξηση του βάρους υπολογίζονταν εκ νέου η ποσότητα τροφής που επρόκειτο να χορηγηθεί στα πειραματικά ενυδρεία. Το επίπεδο διατροφής διατηρήθηκε σταθερό στο 5% καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

2.6 Μετρήσεις μορφομετρικών χαρακτηριστικών

Το ολικό βάρος (W , g) των ατόμων τσιπούρας μετρήθηκε με ζυγό ακριβείας σε ακρίβεια δεύτερου δεκαδικού ψηφίου (Εικ. 9α), ενώ η μέτρηση του ολικού μήκους (L , cm) έγινε με ιχθυόμετρο (Εικ. 9β). Για να μετρηθούν το μήκος και βάρος τα ψάρια αναισθητοποιήθηκαν με φαινοξυαιθανόλη σε πυκνότητα 0,25 mL/L.

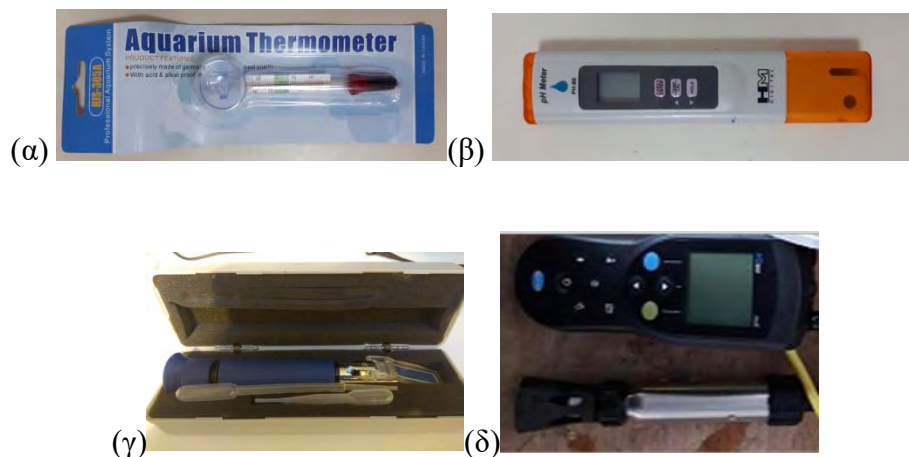


Εικόνα 9. (α) ζυγός ακριβείας (β) ιχθυόμετρο (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).

2.7 Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων

Για τη ρύθμιση των συστημάτων ενυδρείοποιίας μετριούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα (δύο μετρήσεις/εβδομάδα) πριν χορηγηθεί το πρώτο γεύμα οι φυσικοχημικοί παράμετροι του νερού (TAN, NO_2^- , NO_3^- , pH, PO_4^- , $^{\circ}\text{C}$, S ppt) για όλη τη διάρκεια του πειράματος ρύθμισης και λειτουργίας των συστημάτων.

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού πραγματοποιούνταν με ειδικά βυθιζόμενα θερμόμετρα (SUNSUN, HJS-305A). Το pH και η αλατότητα ελέγχονταν δύο φορές την εβδομάδα με ηλεκτρονικό pH μέτρο (HM Digital pH-80) και διαθλασίμετρο, αντίστοιχα (Aqua Medic refractometer) (Εικ.10). Η καταμέτρηση της ολικής αμμωνίας (T.A.N), των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-), των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) και των φωσφορικών ιόντων (PO_4^-) γινόταν δύο φορές την εβδομάδα με ειδικά τεστ kit χρωματομετρίας (Ari). Οι μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου (O_2) γινόταν με ηλεκτρονικό οξυγονόμετρο (HACHHQ 40 D)(Εικ.10).



Εικόνα 10. (α) Θερμόμετρο (β) pHμετρο (γ) Διαθλασίμετρο (δ) Ψηφιακό οξυγονόμετρο
(Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).

2.8 Προσδιορισμός ολικής αμμωνίας-αζώτου (T.A.N.)

Για τη μέτρηση της αμμωνίας (T.A.N) (mg/L) (Εικ. 11) εφαρμόστηκε η μέθοδος των αντιδραστηρίων φαινόλης αλκοόλης σε οξειδωτικό διάλυμα και σιδηρούχο καταλύτη (Liddicoat et al. 1975) σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Λήψη δείγματος από το ενυδρείο των ψαριών
2. Προσθήκη 8 σταγόνων στο δείγμα από το αντιδραστήριο 1
3. Προσθήκη 8 σταγόνων στο δείγμα από το αντιδραστήριο 2
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



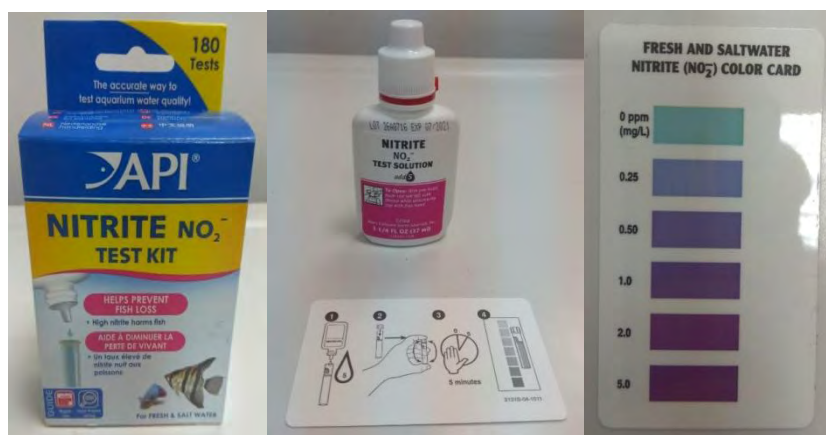
Εικόνα 11. Κιτ προσδιορισμού ολικής αμμωνίας-αζώτου (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).

2.9 Προσδιορισμός νιτρωδών ιόντων (NO₂⁻)

Η μέτρηση των νιτρωδών ιόντων (mg/L) (Εικ. 12) έγινε σύμφωνα 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 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 δείγματος με το χρωματικό πίνακα για προσδιορισμό του αποτελέσματος.



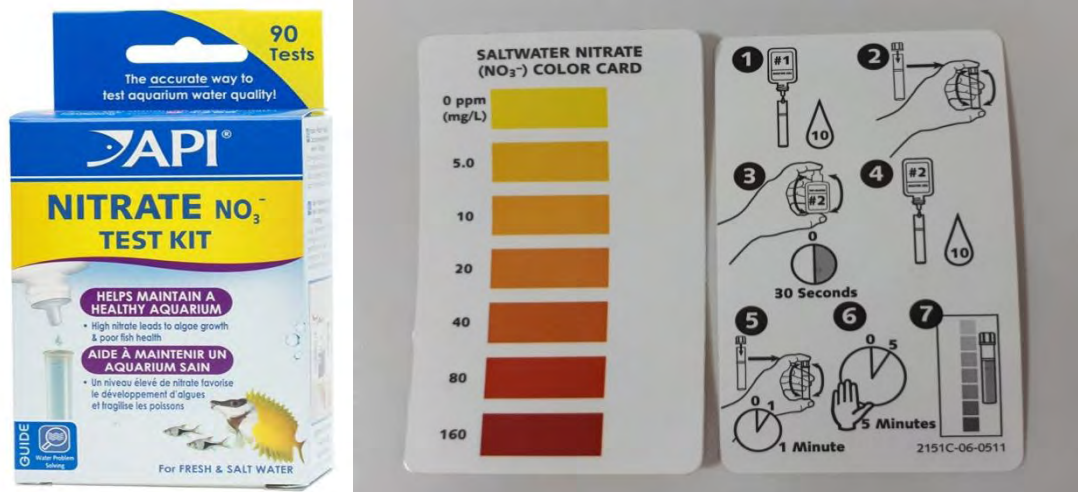
Εικόνα 12. Κιτ προσδιορισμού νιτρωδών ιόντων (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).

2.10 Προσδιορισμός νιτρικών ιόντων (NO₃⁻)

Η μέτρηση των νιτρικών ιόντων (mg/L) (Εικ. 13) έγινε σύμφωνα 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 από το ενυδρείο των ψαριών
2. Προσθήκη 10 σταγόνων στο δείγμα από το πρώτο διάλυμα του kit
3. Κλείσιμο και ανάδευση του δείγματος αρκετές φορές
4. Ανακίνηση του δεύτερου διαλύματος του kit για 30 sec
5. Προσθήκη 10 σταγόνων στο δείγμα από το δεύτερο διάλυμα του kit
6. Ανακίνηση του δείγματος για 1 min
7. Αναμονή 5 min

8. Σύγκριση του δείγματος με το χρωματικό πίνακα για προσδιορισμό του αποτελέσματος.



Εικόνα 13. Κιτ προσδιορισμού νιτρικών ιόντων (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο).

2.11 Υπολογισμοί τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών συστημάτων ενυδρείοπονίας

2.11.1 Ρύθμιση Βιολογικού Φίλτρου

Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας (P_{TAN}) στα συστήματα, είναι αποτέλεσμα της μεταβολικής δράσης των ψαριών και της αποσύνθεσης της ακατανάλωτης τροφής, υπολογίστηκε από τη σχέση (Ebeling et al. 2006):

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

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 ($0,16*0,8*0,8=0,102$)

Η συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας (TAN) υπολογίστηκε από τη σχέση (Huguenin & Colt 2002):

$$TAN = \frac{0,3825 \frac{gr}{d} TAN}{V \text{ φίλτρου (m}^3)}$$

Ιονισμένη αμμωνία = α *TAN

Όπου:

α : το γραμμομοριακό κλάσμα διάσπασης της αμμωνίας στο νερό (εξαρτάται από το pH και την θερμοκρασία)

και

Μη ιονισμένη αμμωνία = TAN-Ιονισμένη αμμωνία

Ο ρυθμός κατανάλωσης της αμμωνίας (R_{TAN}) στα συστήματα υπολογίστηκε επίσης από τη σχέση (Ebeling et al. 2006):

$$R_{TAN} = Q * (C_{TANi} - C_{TAN}) + P_{TAN}$$

Όπου:

Q: ο ρυθμός ροής μέσω του συστήματος

C_{TAN} : η συγκέντρωση TANστη δεξαμενή εκτροφής

C_{TANi} : η συγκέντρωση TANτου φρέσκου νερού

2.11.2 Οξειδωτική Ικανότητα Φίλτρου

A. Μέθοδος Hirayama

Η οξειδωτική ικανότητα του βιολογικού φίλτρου (OCF, mg/min O₂) και το φορτίο ρύπανσης του νερού από τα ψάρια (mg/min O₂) υπολογίστηκαν από την ανισότητα του Hirayama (Spotte 1992):

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

Όπου:

W_i (m²): η έκταση της επιφάνειας του φίλτρου.

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

D_i (cm): πάχος του στρώματος του φίλτρου.

P : ο αριθμός των φίλτρων που εξυπηρετούν το σύστημα.

G_i : συντελεστής που εκφράζει το μέγεθος των κόκκων των υλικών που αποτελούν το υλικό πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου και εκφράζεται από τη σχέση:

$$G = \frac{1}{R_1} * 100 + \frac{1}{R_2} * 100 + \dots + \frac{1}{R_n} * 100$$

όπου :

R_1, R_2, \dots, R_n : διαφορετικό μέγεθος των κόκκων του φίλτρου (mm).

X : το ποσοστό βαρύτητας που καταλαμβάνει το κάθε στρώμα χαλικιού στο σύνολο του φίλτρου.

B : βάρος ψαριού (g).

F : Ημερήσια χορηγούμενη ποσότητα τροφής (g).

q : Αριθμός των ψαριών.

B. Προσδιορισμός Ημίσειου Βάθους

Αυτή η μέθοδος σύμφωνα με τον Spotte (1992), αναφέρεται στο βάθος εκείνο ενός φίλτρου πυθμένα, σύμφωνα με το οποίο το ήμισυ της παραχθείσας συγκέντρωσης αμμωνίας από το μεταβολισμό της τροφής, οξειδώνεται με ένα πέρασμα (ανακύκλωση) όλου του όγκου του νερού από το φίλτρο.

1) Παροχή νερού (Q)

$$Q = F \cdot S$$

Όπου:

Q = παροχή νερού διά μέσου ενός φίλτρου πυθμένα (m^3/s)

F = ταχύτητα της ροής (m/s)

S = επιφάνεια του φίλτρου (m^2)

2) Επιφάνεια φίλτρου (S)

$$S = V/H$$

Όπου:

V = Όγκος του νερού του ενυδρείου σε m^3

H = Ύψος της στήλης του νερού σε m

3) Χρόνος ανακύκλωσης νερού (T)

$$T = \text{βάθος}/F$$

Όπου:

Βάθος = Το ύψος της στήλης του νερού (συμπεριλαμβανομένου και του ύψους του φίλτρου πυθμένα) σε m

F = Η ταχύτητα ροής που υπολογίζεται κατά τα προηγούμενα

4) Μάζα ολικής αμμωνίας που προστίθεται στο σύστημα ανά χρόνο ανακύκλωσης (r)

$r = (\text{παρεχόμενη τροφή}) * (\text{ποσοστό αμμωνίας στην τροφή}) * (\text{χρόνος ανακύκλωσης νερού})$

Όπου:

Παρεχόμενη τροφή = η ποσότητα τροφής που δίδεται καθημερινά [g/day ή g/(86.400 sec), επειδή το 24ωρο έχει 86.400 sec]

Ποσοστό αμμωνίας στην τροφή = η % παραγόμενη ποσότητα ολικής αμμωνίας (TAN) ανά kg μεταβολιζόμενης τροφής (N = 3,2%)

Χρόνος ανακύκλωσης νερού = η παραπάνω αναφερόμενη τιμή του T σε sec

5) Προστιθέμενη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας (TAN) ανά όγκο ανά χρόνο ανακύκλωσης (c)

$$c = r/v$$

Όπου:

c = Προστιθέμενη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας (TAN) ανά όγκο ανά χρόνο ανακύκλωσης

6) Συντελεστής μείωσης της συγκέντρωσης αμμωνίας (R)

$$R = (c - U)/(U * \ln 2)$$

Όπου:

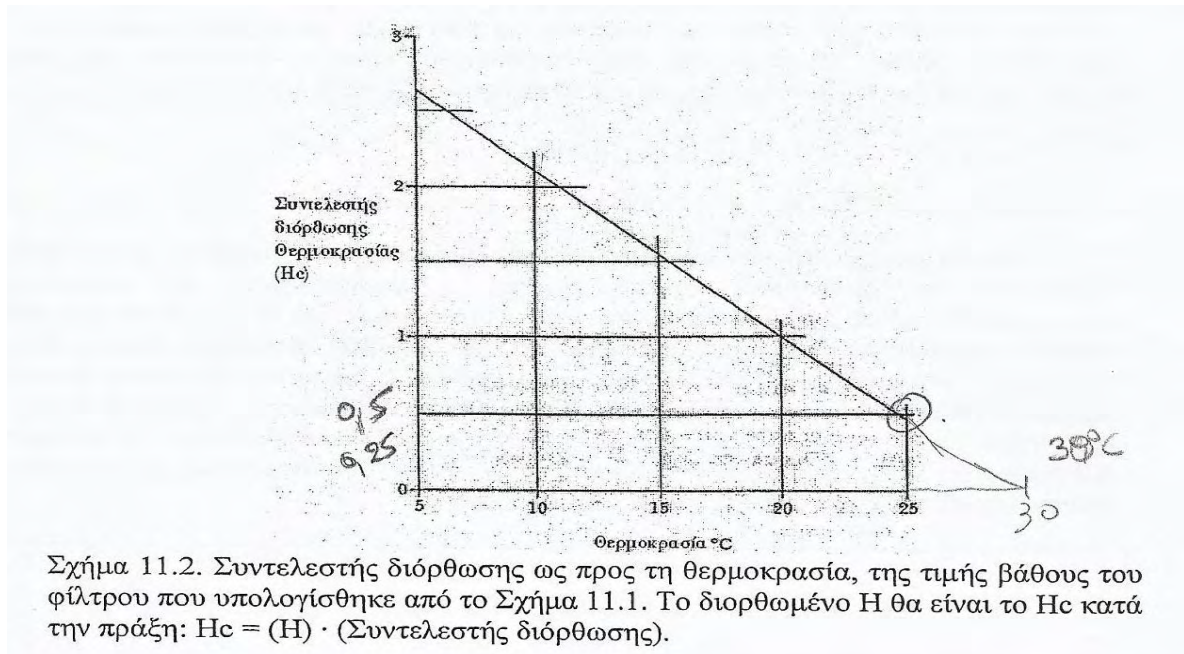
U = Επιτρεπτή συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας (TAN) στο νερό (σε mg/L)

$H_c = (H) \cdot (\text{συντελεστής διορθώσης})$.

Όπου:

H_c = ήμισυ βάθους διορθωμένο για θερμοκρασία (κατά Spotte 1992)

H = ήμισυ βάθος



Εικόνα 14. Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή διορθώσης (Πηγή: Χώτος (2001))

2.11.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά βιολογικού φίλτρου

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

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

$$\mathbf{\text{Ρυθμός ανακύκλωσης (r)}} = \text{όγκος ανακύκλωσης/συνολικός όγκος νερού στο ενυδρείο}$$

$$\mathbf{\text{Υδραυλικός χρόνος παραμονής (t)}} = \text{επιφάνεια φίλτρου (W) x βάθος νερού x πορώδες υλικού φίλτρου (s)/ παροχή νερού (Q)}$$

Η συνολική ειδική επιφάνεια του φίλτρου που απαιτείται για την απομάκρυνση της παραγόμενης αμμωνίας στο σύστημα ο όγκος μέσω φίλτρου και η επιφάνεια μέσω φίλτρου υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (Huguenin & Colt 2002):

$$\mathbf{SSA} = \frac{\text{Παραγόμενη αμμωνία (g/d)}}{\text{Αφαιρούμενη αμμωνία } (\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{d})}$$

$$\mathbf{\text{Όγκος μέσω (υλικά πλήρωσης)}} = \frac{\text{Επιφάνεια μέσω φίλτρου (m}^2\text{)}}{\text{SSA (m}^2\text{/m}^3\text{)}}$$

$$\mathbf{SSA \text{ μέσω (υλικά πλήρωσης)}} = \text{όγκος φίλτρου (V) * } \frac{\text{επιφάνεια (W)}}{\text{μονάδα όγκου}}$$

Όπου:

$$\mathbf{V \text{ (m}^3\text{)}} = \text{βάθος * μήκος * πλάτος}$$

Η παροχή του νερού (Q) μετρήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στον Spotte (1992), όπου σε ογκομετρικό κύλινδρο των 1000 mL μετρήθηκε ο όγκος του νερού που καταλάμβανε ο κύλινδρος στη μονάδα του χρόνου (10 sec). Η

διαδικασία επαναλήφθηκε 3 φορές και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος της παροχής για κάθε ενυδρειοπονικό σύστημα.

$$Q = (\pi D^2/4) * V$$

Όπου:

$$\pi=3,14$$

D: διάμετρος σωλήνα (cm),

V: όγκος νερού που εκτοπίστηκε (cm³)

Η ροή του αέρα μετρήθηκε με ογκομετρικό κύλινδρο 1000 mL. Ο ογκομετρικός κύλινδρος πληρώθηκε με νερό και στη συνέχεια βυθίστηκε κατακόρυφα στο ενυδρείο των ψαριών και φυτών έτσι ώστε να αφαιρεθεί κάθε ίχνος φυσαλίδας αέρα. Η ροή μετρήθηκε τοποθετώντας την αερόπετρα με την παροχή στη μονάδα του χρόνου και υπολογίστηκε ο όγκος του νερού που εκτοπίστηκε (L) στη μονάδα του χρόνου (1 min).

Τέλος, η ταχύτητα φιλτραρίσματος (U) υπολογίστηκε από τη σχέση (Spotte 1992):

$$U \text{ (cm/min)} = \text{παροχή (Q)/επιφάνεια φιλτραρίσματος (W)}$$

2.12 Πρόγραμμα διαχείρισης

Σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας με ανακυκλοφορία νερού (RAS) ο έλεγχος και η διατήρηση της ποιότητας του νερού όπως και της υγείας των ψαριών είναι πολύ σημαντικά. Για αυτό δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα για τη διαχείριση των συστημάτων ενυδρειοπονίας που περιλάμβανε διάφορες εργασίες που πραγματοποιούνταν σε

ημερήσια βάση καθώς και σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (εβδομαδιαία ή μηνιαία) (Brensballe et al. 2010).

Οι ημερήσιες ή εβδομαδιαίες ήταν:

- Έλεγχος τις συμπεριφοράς των ψαριών (παρατήρηση)
- Οπτικός έλεγχος της ποιότητας του νερού (θολερότητα)
- Έλεγχος της ροής του νερού
- Έλεγχος της στάθμης του νερού (σε ενυδρεία και φίλτρα/αντλίες)
- Απομάκρυνση και καταγραφή νεκρών ψαριών
- Έλεγχος και καταγραφή του οξυγόνου στα ενυδρεία
- Έλεγχος και καθαρισμός μηχανικών φίλτρων
- Έλεγχος και καταγραφή της θερμοκρασίας
- Έλεγχος της αλατότητα
- Πραγματοποίηση μετρήσεων για αμμωνία, νιτρώδη και νιτρικά ιόντα και pH και καταγραφή τους
- Καθημερινό τάισμα ψαριών
- Καθαρισμός/ σιφωνισμός ενυδρείων

Οι εβδομαδιαίες ή μηνιαίες ήταν:

- Καθαρισμός βιολογικού φίλτρου
- Ρύθμιση pH
- Έλεγχος όλων των αντλιών (αεραντλίες-αντλίες νερού)
- Έλεγχος στάθμης και ανανέωση νερού backup

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ρύθμιση συστήματος

Στο πείραμα αξιολογήθηκαν τα ποσοστά απομάκρυνσης της ολικής αμμωνίας και της οξείδωσής της σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά ιόντα στις δύο διαφορετικές αλατότητες. Η βιολογική ρύθμιση του κάθε συστήματος ενυδρειοπονίας επιτεύχθηκε διαμέσου της μεθοδολογίας που περιγράφεται από τους Vlahos et al (2004), Vlahos et al. (2014) και Vlahos et al. (2016). Με τις εβδομαδιαίες μετρήσεις της ολικής αμμωνίας (Total Ammonium Nitrogen, T.A.N), των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-) και των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) που πραγματοποιούνταν, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των νιτρωδών ξεκίνησε την 2^η ημέρα και την 7^η ημέρα ξεκίνησε η μείωση της αμμωνίας μικρότερες από 1 mg/L και στις δύο αλατότητες. Η ρύθμιση επήλθε την 35^η ημέρα, όπου τα νιτρώδη ιόντα μειώθηκαν στο 0 mg/L για το σύστημα ενυδρειοπονίας με αλατότητα 8 ppt και στα 0,5 mg/L στα 20 ppt (Σχ.3) και τα νιτρικά ιόντα άρχισαν να αυξάνονται σε σταθερά επίπεδα φτάνοντας την μέγιστη τιμή τους την 62^η ημέρα λαμβάνοντας τιμή 160 mg/L και στις δύο αλατότητες (Σχ. 4) (Πιν. 1). Σε αυτό το σημείο, μια επαρκής αποικία νιτροποιητικών βακτηρίων είχε σχηματιστεί στο βιολογικό φίλτρο και έγινε η προσθήκη ψαριών και φυτών στο σύστημα για την εκκίνηση του πειράματος.

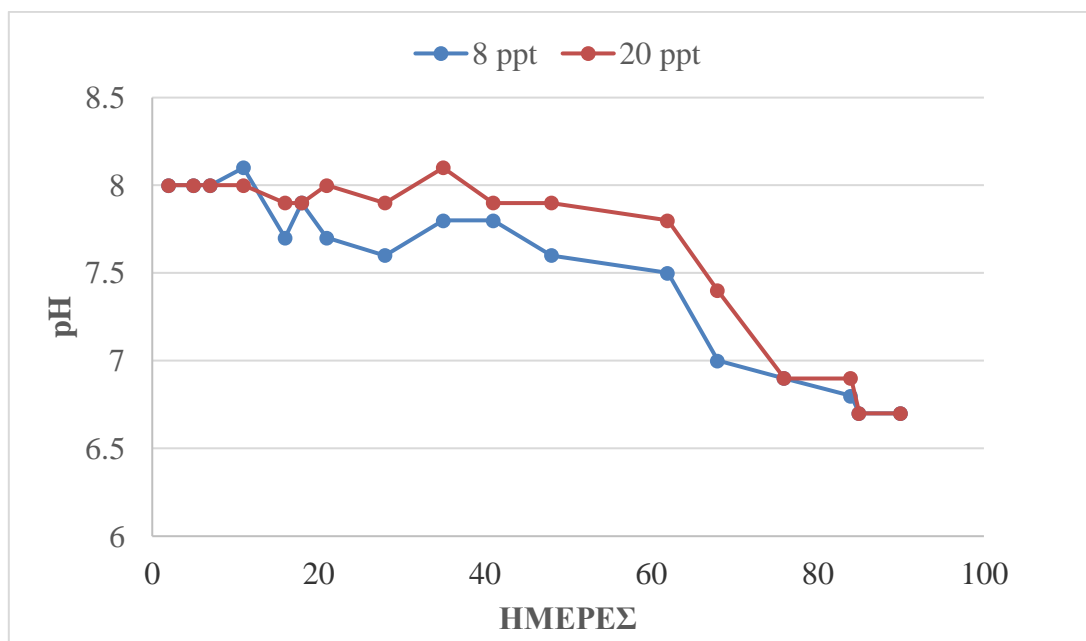
3.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος το pH κυμάνθηκε για την αλατότητα 8 ppt στο $7,54 \pm 0,05$ και για την αλατότητα 20 ppt στο $7,73 \pm 0,042$ (Πιν. 3).

Πίνακας 3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά νερού στα συστήματα ενυδρείοποιίας με αλατότητα 8 ppt και 20 ppt, αντίστοιχα. Τα δεδομένα εκφράζονται ως Μέσες Τιμές \pm SEM. Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p > 0,05$).

	8 ppt	20 ppt
TAN (mg/L)	$0,45 \pm 0,11^a$	$0,33 \pm 0,8^a$
Ιονισμένη αμμωνία	$0,0078 \pm 0,002$	$0,0052 \pm 0,002$
Μη ιονισμένη αμμωνία	$0,44 \pm 0,001$	$0,32 \pm 0,001$
NO ₂ ⁻ (mg/L)	$0,89 \pm 0,3^a$	$0,82 \pm 0,3^a$
NO ₃ ⁻ (mg/L)	$76,4 \pm 11,2^a$	$77,2 \pm 11,8^a$
pH	$7,54 \pm 0,05^a$	$7,73 \pm 0,042^a$

Η διακύμανση του pH (Σχ.1) ξεκινά και στις δύο αλατότητες με τιμές κοντά στο 8 και στη συνέχεια παρατηρείται μια συνεχής φθίνουσα πορεία, με τη μείωση να επιταχύνεται μετά την προσθήκη των φυτών, με ελάχιστη τιμή το 6,7.

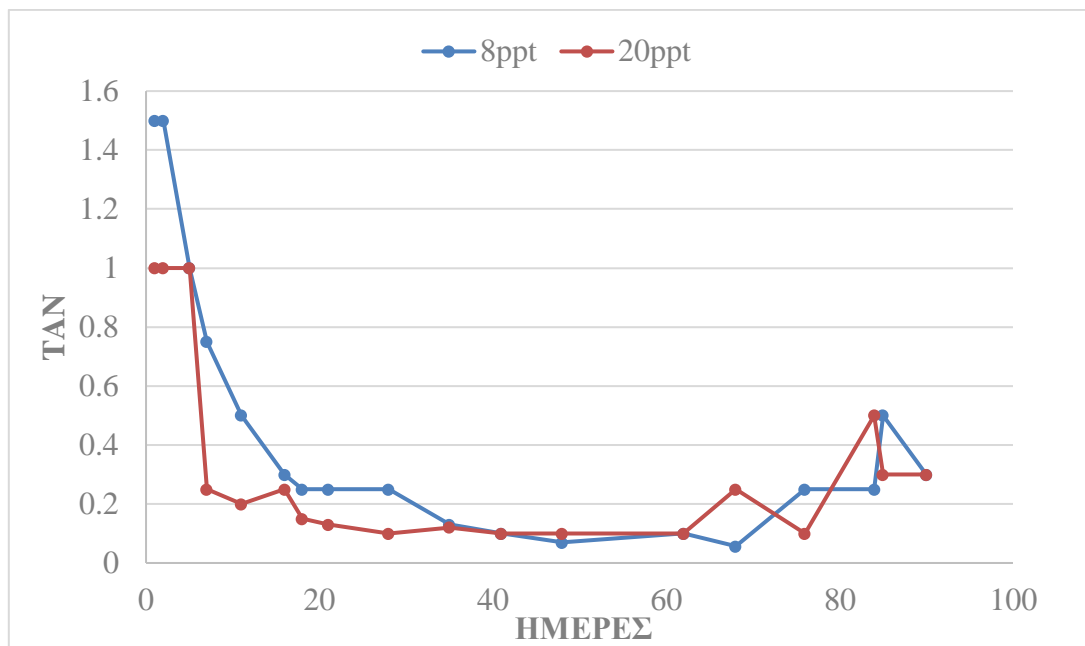


Σχήμα 1. Διάγραμμα διακύμανσης του pH στα δύο συστήματα ενυδρείοπονίας με αλατότητα 8 ppt και 20 ppt σε χρονικό διάστημα 90 ημερών.

Η ολική αμμωνία (TAN) σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας κυμάνθηκε στο $0,45 \pm 0,11$ για την αλατότητα 8 ppt και στο $0,33 \pm 0,8$ για την αλατότητα 20 ppt (Πιν. 3), με μέγιστες τιμές 1,5 και 1 στην αρχή του πειράματος για τις αλατότητες αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2, οι διακυμάνσεις της αμμωνίας και για τις δύο αλατότητες δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις με τις ελάχιστες τιμές να φτάνουν τις μηδενικές (0,057) για την αλατότητα 8 ppt το 0,1 για τα 20 ppt.

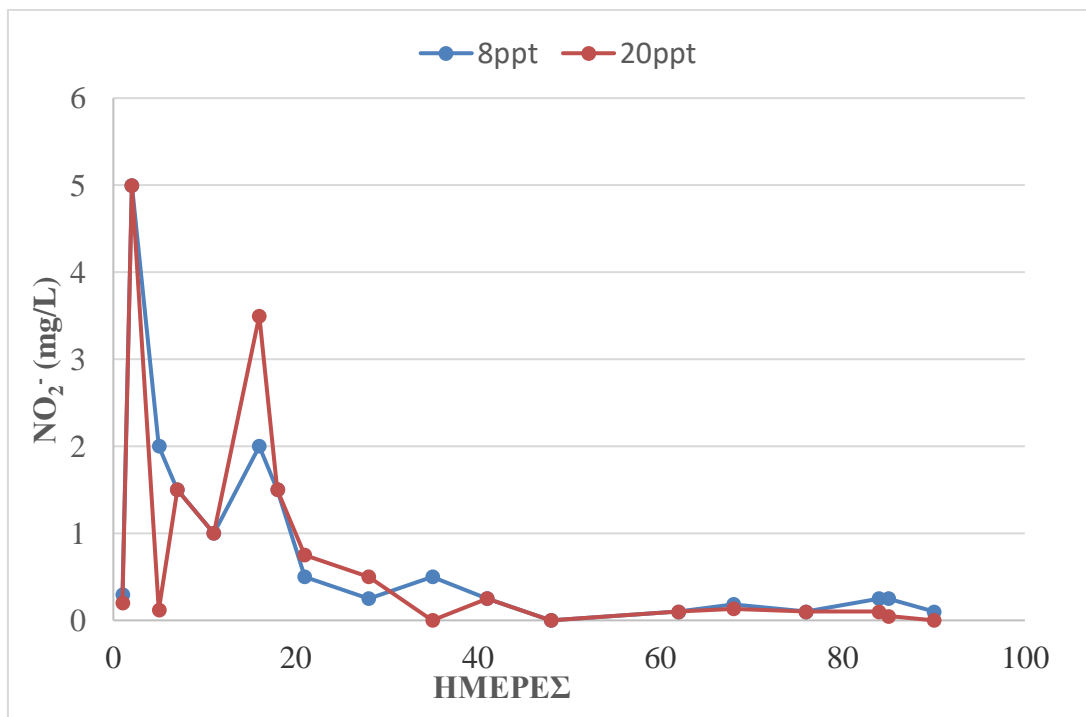
Οι τιμές της ιονισμένης αμμωνίας (NH_3^-) κυμάνθηκαν στα $0,0078 \pm 0,002$ για την αλατότητα 8 ppt και στα $0,0052 \pm 0,002$ για την αλατότητα 20 ppt.

Οι τιμή της μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_4^+) κυμάνθηκε στα $0,44 \pm 0,001$ και για τις δύο αλατότητες.



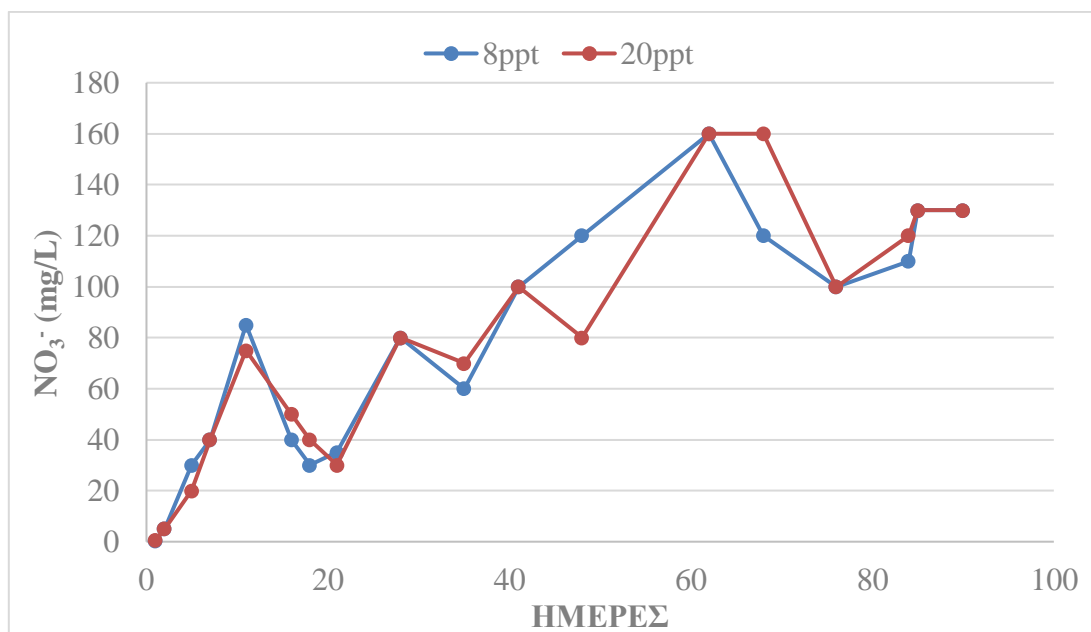
Σχήμα 2. Διάγραμμα διακύμανσης της ολικής αμμωνίας στα δύο συστήματα ενυδρείοποιίας με αλατότητα 8 ppt και 20 ppt σε χρονικό διάστημα 90 ημερών.

Οι τιμές των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-) κυμάνθηκαν στα $0,89 \pm 0,3 \text{ mg/L}$ για την αλατότητα 8 ppt και στα $0,82 \pm 0,3 \text{ mg/L}$ για την αλατότητα 20 ppt (Πιν. 3). Οι διακυμάνσεις τους παρουσιάζουν αρκετές αυξομειώσεις (με μία σημαντική αύξηση τη 16^η ημέρα) αλλά όχι σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο αλατοτήτων (Σχ. 3) με μέγιστη τιμή τα 5 mg/L την 2^η μέρα και ελάχιστη τα 0 mg/L την 35^η ημέρα, που είναι λογικό αφού αυτήν την ημέρα ολοκληρώθηκε η ρύθμιση του συστήματος (αν και η αλατότητα 8 ppt είχε μια μικρή ποσότητα $0,5 \text{ mg/L}$).



Σχήμα 3. Διάγραμμα διακύμανσης των νιτρωδών ιόντων στα δύο συστήματα ενυδρείοπονίας με αλατότητα 8 ppt και 20 ppt σε χρονικό διάστημα 90 ημερών.

Τέλος, η διακύμανση των νιτρικών (NO_3^-) είναι σχετικά σταθερά αυξανόμενη με μία μείωση τη 16^η ημέρα που εξηγείται από την αύξηση των νιτρωδών την ίδια ημέρα και μια απότομη μείωση την 76^η ημέρα η οποία οφείλεται στην απορρόφησή τους από τα φυτά (Σχ. 4). Οι τιμές τους κυμάνθηκαν στα $76,4 \pm 11,2$ mg/L για τα 8 ppt και στα $77,2 \pm 11,8$ mg/L για τα 20 ppt (Πιν. 3), με μέγιστη τιμή 160 και στις 2 αλατότητες και ελάχιστη το 0,4 και 0,5 αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Διάγραμμα διακύμανσης των νιτρικών ιόντων στα δύο συστήματα ενυδραιοπονίας με αλατότητα 8 ppt και 20 ppt σε χρονικό διάστημα 90 ημερών.

3.3 Οξειδωτική ικανότητα φίλτρου

Η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του φίλτρου στα συστήματα ενυδραιοπονίας είναι υψίστης σημασίας, καθώς καθορίζουν τον αριθμό των ψαριών που προστίθενται στο σύστημα, καθώς και το φορτίο ρύπανσης που δημιουργείται από τα ψάρια. Για αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι υπολογισμού της ικανότητας φόρτισης του φίλτρου μέσω της ανισότητας του Hirayama και της μεθόδου ημίσεως βάθους (Spotte 1992), η οποία χρησιμοποιείται συμπληρωματικά της πρώτης.

Οι μέθοδοι επιχειρούν να βελτιστοποιήσουν το ενεργό και λειτουργικό βάθος του βιολογικού φίλτρου του οποίου η νιτροποιητική ικανότητα διαμορφώνεται από τα μηχανικά του χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα (υδραυλικός χρόνος παραμονής, ειδική επιφάνεια φίλτρου, υδραυλικό φορτίο, μέσο πλήρωσης φίλτρου).

Τα αποτελέσματα της απόδοσης του φίλτρου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Οξειδωτική ικανότητα, φορτίο ρύπανσης του βιολογικού φίλτρου.

	8 ppt	20 ppt
Μέγιστος αριθμός ψαριών (άτομα)	40	40
Ελάχιστος αριθμός ψαριών (άτομα)	30	30
Προσθήκη ψαριών ανά σύστημα (άτομα)	26	26
Οξειδωτική ικανότητα φίλτρου mg O₂/L	0,54	0,54
Συνολικό φορτίο (ζωικό) ρύπανσης mg O₂/L	0,3	0,3
Φορτίο ρύπανσης /άτομο mg O₂ /L	0,012	0,012
Ικανοποίηση συνθήκης Hirayama (mg O₂ /L)	0,54>0,3	0,54>0,3

Στη μέθοδο Hirayama πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη θεωρήθηκε ως δεδομένο την χορήγηση τροφής 5% και βρέθηκε ελάχιστο όριο των ψαριών που μπορούσε να συντηρήσει το σύστημα ήταν 30 άτομα με μέσο βάρος 2,5 gr και φορτίο ρύπανσης 2,16 mg O₂/L, που δεν ικανοποιούσε την συνθήκη του Hirayama. Στη δεύτερη θεωρήθηκε πως τα ψάρια ήταν σε ασιτία και άρα η χορήγηση τροφής ήταν 0% και βρέθηκε πως ο μεγαλύτερος αριθμός ατόμων στο σύστημα ήταν 40 άτομα, τα οποία όμως δεν μπορούσαν να υποβληθούν σε ασιτία σε καμία περίπτωση. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο ρύπανσης ήταν κατά πολύ μεγαλύτερο (2,88 mg O₂/L) με αποτέλεσμα να μην ικανοποιείται η συνθήκη του Hirayama.

Ο τελικός αριθμός ατόμων που προστέθηκε στο κάθε σύστημα ήταν 26 άτομα γιατί ικανοποιούνταν η συνθήκη του Hirayama, δηλαδή:

Οξειδωτική Ικανότητα (0,54 mg O₂/L) > Φορτίο Ρύπανσης (0,3 mg O₂/L)

Η μέθοδος του ημίσεως βάθους λειτούργησε συμπληρωματικά της πρώτης και σημαίνει : «εκείνο το βάθος ενός φίλτρου πυθμένα, με το οποίο το ήμισυ της παραγόμενης από το μεταβολισμό της τροφής αμμωνίας, εξουδετερώνεται (οξειδώνεται σε νιτρικά) με ένα πέρασμα από το φίλτρο (δηλαδή με μία ανακύκλωση όλου του όγκου νερού του ενυδρείου μέσω του φίλτρου (πυθμένα)» (Spotte 1992).

Για την εφαρμογή της μεθόδου θεωρήθηκε ότι:

- Τα ψάρια απεκκρίνουν όλο το άζωτο που λαμβάνουν από την τροφή τους και δεν κατακρατείτε στους ιστούς τους και
- Το άζωτο απεκκρίνεται με σταθερό ρυθμό συνεχώς ανεξαρτήτως από τη συχνότητα με την οποία τρέφονται τα ψάρια.

Η μεθοδολογία της επίλυσης μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ ή όχι μερικών κριτηρίων:

- Το ελάχιστο βάθος ενός φίλτρου πυθμένα να μην είναι μικρότερο των 7 εκατοστών ανεξάρτητα του μεγέθους του ενυδρείου
- Οι επιφάνειες του φίλτρου πυθμένα και εκείνη του ενυδρείου να είναι ίσες.
- Η ταχύτητα του νερού δια μέσου του φίλτρου να είναι μικρότερη από 0,00068 m/s.

Στην περίπτωση των συστημάτων το τελευταίο δεν ισχύει και άρα υπολογίζεται εκ νέου. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου αποτελέσματος χρησιμοποιήθηκε το ανώτατο ποσοστό παραγόμενης αμμωνίας που είναι 3,2%.

Τελικά, βρέθηκε πως το λειτουργικό βάθος του φίλτρου είναι $D1= 0,22$ m για την αλατότητα των 8ppt και $D2= 0,11$ m για την αλατότητα των 20 ppt.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα του ημίσεως βάθους βιολογικού φίλτρου στα συστήματα ενυδρείων για τις δύο αλατότητες.

	8 ppt	20 ppt
Παροχή νερού (Q) (m^3/s)	0,0025	0,0025
Όγκος Ενυδρείου (V) (m^3)	0,05535	0,05535
T ($^{\circ}C$)	23	23
Ταχύτητα ροής (F) (m/s)	0,0101	0,0101
Ημερήσια Ποσότητα τροφής (gr)	17,11	17,11
Μάζα Ολικής αμμωνίας/ χρόνο ανακύκλωσης (r) (g)	0,01	0,01
Ολική αμμωνία ανά όγκο /ανά χρόνο ανακύκλωσης (c) (mg/L)	0,18	0,18
Ανώτατη συγκέντρωση Ολικής αμμωνίας (U) (mg/L)	0,0043	0,0039
Ειδική επιφάνεια φίλτρου (SSA) (m^2/m^3)	568	568
Συντελεστής κενού (P)	0,8	0,8
Χρόνος ανακύκλωσης νερού (T) (s)	22,08	22,08
Συντελεστής μείωσης συγκέντρωσης αμμωνίας (R)	58,57	30,89
Ήμισυ βάθος (m)	0,8	0,8
Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας	0,46	0,46
Ήμισυ Βάθος διορθωμένο για θερμοκρασία (m)	0,4	0,4
Τελικό λειτουργικό βάθος φίλτρου (D) (m)	0,22	0,11

3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά φίλτρου

Ο Πίνακας 6 αντιπαραθέτει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φίλτρου στις δύο διαφορετικές αλατότητες των συστημάτων 8 ppt και 20 ppt, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές του υδραυλικού φορτίου, του ρυθμού ανακύκλωσης, του υδραυλικού χρόνου παραμονής και του όγκου του φίλτρου μεταξύ των δύο συστημάτων. Στην περίπτωση της ειδικής επιφάνειας του φίλτρου (SSA), το SSA των 20 ppt ήταν σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των 8 ppt με αποτέλεσμα να επηρεάσει και τον όγκο των υλικών πλήρωσης του φίλτρου.

Πίνακας 6. Λειτουργικά χαρακτηριστικά φίλτρου στα δύο συστήματα ενυδρειοπονίας αλατότητας 8 ppt και 20 ppt, αντίστοιχα. Τα δεδομένα εκφράζονται ως Μέσες Τιμές ± SEM (n=6). Οι μέσοι όροι κάθε παραμέτρου μεταξύ των μεταχειρίσεων που φέρουν τον ίδιο εκθέτη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (P>0,05).

	8 ppt	20 ppt
Υδραυλικό Φορτίο (HRL)	1,85 ± 0,005 ^a	1,85 ± 0,005 ^a
Ρυθμός Ανακύκλωσης (r) (min)	0,014 ± 0,003 ^a	0,014 ± 0,003 ^a
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (min)	9,7 ± 0,01 ^a	9,7 ± 0,02 ^a
Ειδική Επιφάνεια Φίλτρου (SSA) (m ² /m ³)	162 ± 0,30 ^a	224 ± 0,31 ^b
Όγκος Μέσων Φίλτρου (V) (m ³)	6,73 ± 0,02 ^a	6,94 ± 0,08 ^b
Όγκος Φίλτρου (V) (L)	32,13 ± 0,001 ^a	32,13 ± 0,001 ^a

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Συζήτηση

Η ενυδραιοπονία είναι μια πρωτοπόρα μέθοδος παραγωγής οργανικών τροφίμων, χωρίς τη χρήση χημικών λιπασμάτων και χωρίς απόρριψη νερού, αξιοποιώντας τις καλύτερες ιδιότητες της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλει στην επίλυση πιθανών περιβαλλοντικών βλαβών της ιχθυοκαλλιέργειας, στην εξάντληση του πόσιμου νερού, στην μείωση γονιμότητας εδαφών και τη βιοποικιλότητα. Έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών και λόγω αυτού υπάρχουν αρκετές έρευνες σχετικά με τα συστήματα ενυδραιοπονίας αν και οι ελλείψεις είναι ακόμη αρκετές (Somerville 2014).

Ο σχεδιασμός και η ρύθμιση του συστήματος αποτελεί βασικό στόχο για την επιτυχή λειτουργία του και για αυτό θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκτέλεσή του. Σύμφωνα με τον Somerville et al. (2014) ένα πολύ κοινό λάθος είναι η τοποθέτηση πολλών φυτών και λιγότερων ψαριών στο σύστημα με αποτέλεσμα να διαταρράσσεται η ισορροπία, καθώς τα νιτρικά που παράγονται από την αμμωνία των ψαριών δεν είναι επαρκή για να καλύψουν τις ανάγκες των φυτών. Το αντίθετο επίσης συμβαίνει, όπου τα νιτρικά είναι αυξημένα για τα φυτά και έτσι το νερό γίνεται τοξικό για τα ψάρια.

Το συμπέρασμα από τα παραπάνω παραδείγματα είναι πως πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ ψαριών, φυτών, αλλά και της επιφάνειας βιολογικού φίλτρου για την ανάπτυξη των βακτηρίων, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή του συστήματος. Σύμφωνα με τον Spotte (1992) ο καλύτερος τρόπος για την επίτευξη της

απαιτούμενης ισορροπίας είναι η μέθοδος της ανισότητας του Hirayama και η μέθοδος ημίσεως βάθους. Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας έδειξαν ότι η ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος επιτυγχάνεται προσθέτοντας συνολικά 26 ψάρια σε κάθε ενυδρείο και αντίστοιχα 6 φυτά και συνολικά 7 λίτρα βιολογικού υλικού.

Συγκεκριμένα, στο παρόν πείραμα συστημάτων ενυδρειονίας υφάλμυρου νερού εκτροφής τσιπούρας βρέθηκε παροχή ίση με $1496 \text{ cm}^3/\text{min}$, οξειδωτική ικανότητα φίλτρου $0,54 \text{ mg/L}$ και φορτίο ρύπανσης $0,3 \text{ mg/L}$. Τα αποτελέσματα αυτά ως προς την παροχή ήταν μικρότερα και μεγαλύτερα ως προς την οξειδωτική ικανότητα και το φορτίο ρύπανσης, με εκείνα του Βλάχος (2014), όπου σε ενυδρείο γλυκού νερού με αγγελόψαρα και κιχλιδόζεμπρες με ταυτόσημο σωματικό βάρος ατόμου με τα συστήματα ενυδρευοπονίας ($2,5 \text{ gr}$), η παροχή βρέθηκε ίση με $5118 \text{ cm}^3/\text{min}$, η οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου $0,17 \text{ mg/L}$ και το φορτίο ρύπανσης $0,13 \text{ mg/L}$.

Στα συστήματα του πειράματος το pH σε αλατότητα 8ppt και 20 ppt βρέθηκε να είναι 7,73 και 7,54 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα των Kotzen & Appelbaum (2010) όπου το pH παρουσίασε αντίστοιχα παρόμοιες διακυμάνσεις.

Η ολική αμμωνία (TAN) στα συγκεκριμένα συστήματα με αλατότητα 8 ppt κυμαινόταν στο $0,45 \text{ mg/L}$, ενώ τα νιτρώδη και νιτρικά είχαν τιμές $0,89 \text{ mg/L}$ και $76,4 \text{ mg/L}$ αντίστοιχα. Στα συστήματα αλατότητας 20 ppt η ολική αμμωνία είχε μέση τιμή $0,33 \text{ mg/L}$ και τα νιτρώδη και νιτρικά $0,82 \text{ mg/L}$ και $77,2 \text{ mg/L}$ αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να συμφωνούν με εκείνα των Nozzi et al (2016), οι οποίοι διεξήγαγαν πείραμα με θαλάσσιο σύστημα ενυδρευοπονίας λαυρακιού. Τα νιτρικά ιόντα παρουσίασαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης, παρόμοια με εκείνα της παρούσας πειραματικής εργασίας.

Αντίθετα, στο υφάλμυρο ενυδραιοπονικό σύστημα εκτροφής τιλάπιας των Kotzen & Appelbaum (2010) οι παράμετροι των αζωτούχων ενώσεων ήταν κατά μέσο όρο μικρότερες από τα υφάλμυρα συστήματα εκτροφής τσιπούρας του παρόντος πειράματος. Συγκεκριμένα, η τιμή της ολικής αμμωνίας (TAN), των νιτρωδών ιόντων και των νιτρικών ιόντων ήταν 0,14 mg/L, 0,25 mg/L και 4,18 mg/L αντίστοιχα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υπολογίστηκε το υδραυλικό φορτίο του συστήματος στα 1,85 m/ day και για τις δύο αλατότητες, στην οποία τιμή σύμφωνα με τους Καπετάνιος & Φράγκου (2019) υπήρξε ο μεγαλύτερος ρυθμός ανάπτυξης (SGR) στα 3,17 %/ day και στις δύο, αντίστοιχα. Σε αντίθεση οι Endut et al. (2009), βρήκαν βέλτιστο ρυθμό ανάπτυξης σε υδραυλικό φορτίο 1,28 m/ day.

4.2. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διατριβή είναι ότι:

- Η επιτυχία ενός συστήματος ενυδραιοπονίας εξαρτάται από σωστό σχεδιασμό, κατασκευή και ρύθμισή του.
- Η σωστή λειτουργία του συστήματος βασίζεται στις ισορροπίες μεταξύ των συμβιωτικών οργανισμών του.
- Η παράλληλη καλλιέργεια ευρύαλων ψαριών και αλόφυτων σε ένα υφάλμυρο ενυδραιοπονικό σύστημα είναι εφικτή.
- Υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση πάνω στα υφάλμυρα ενυδραιοπονικά συστήματα σε διαφορετικές κλίμακες, αφού είναι μια πρωτοπόρα και καινοτόμος μελέτη στον τομέα της ενυδραιοπονίας που έχει μεγάλη προοπτική για το μέλλον.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

5.1 ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brengballe J. (2010) Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & EUROFISH International Organisation, pp 100.
- Ebeling J. M., Timmons M.B., Bisogni J.J (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257(1-4), p 346-358.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.B., Hassan A. (2009). Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. Kuala Terengganu, Malaysia, 5, p 19-28.
- 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. Naklo, Slovenia, p 1-8.
- Huguenin J.E., Colt J. (2002) Design and Operating Guide for Aquaculture Seawater Systems. Vol. 33 Elsevier 2nd Edition 2002 Amsterdam. The Netherlands, pp 327.

- Kotzen B., Appelbaum S. (2010) An Investigation of Aquaponics Using Brackish Water Resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture*, 22 (4), p 297-320.
- Lekang O.I. (2007) *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing. Oxford, pp 340.
- Liddicoat M. I., Tibhitts S., Butler E. I. (1975) The Determination of Ammonia in Seawater. *Limnology and Oceanography*, vol. 20, no. 1, pp. 131–132.
- Mcmurtry, M.R., Sanders, D.C., Cure, J.D., Hudson, R.G., Haning, B.C., Amand, P.C.S., 1997. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *J. World Aquac. Soc.* 28, pp. 420–428.
- Mente E., Solovyev M., Vlahos N., Rotllant G., Gisbert, E. (2016). Digestive Enzyme Activity during Initial Ontogeny and after Feeding Diets with Different Protein Sources in Zebra Cichlid, *Archocentrus nigrofasciatus*. *Journal of the World Aquaculture Society*.
- Nozzi V., Strofaldi S., Piquer F.I., Di Crescenzo D., Olivotto I., Carnevali O. (2016) *Amyloodinum ocellatum* in *Dicentrarchus labrax*: Study of infection in salt water and freshwater aquaponics. *Fish & Shellfish Immunology*, Department of Life and Environmental Sciences, Ancona, Italy, 57, p 179-185.
- Ragnheidur I.T., Kledal P.R., Skar S.L.G., Sustaeta F., Ragnarsdotti K.V., Mankasing U., Pantanella E., Rob van de Ven, Shult R.C. (2015) *Aquaponics Guidelines*. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, p 1-69.
- 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, pp 266.

Spotte S. (1992) Captive Seawater Fishes. John Wiley & Sons, New York, pp 94.

Vlahos, N., Hotos, G., Kapetanios N. (2004) The effect of temperature on the conditioning of the filter bed in aquaria. 2nd International Congress on Aquaculture, Fisheries Technology and Environmental Management. Athens 18-19 June 2004.

Wahyuningsih S., Effendi H., Wardiatno Y. (2015). Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system. AACL Bioflux. 8.

Waller U., Buhmann A.K., Ernst A., Hanke V., Kulakowski A., Wecker B., Orellana J., Papenbrock J. (2015) Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. Aquaculture International. p 1-17.

5.2 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βλάχος Ν. (2014) Βιολογία και φυσιολογία θρέψης διακοσμητικών ψαριών σε ενυδρεία. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος, σελ. 338.

Βλάχος Ν. (2017) Ενυδρεία. ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας Υδατοκαλλιεργειών, σελ. 77.

Καπετάνιος Ε., Φράγκου Σ. (2019). Ενυδρειοπονία σε υφάλμυρο νερό: εκτροφή τσιπούρας και καλλιέργεια κρίταμου σε δύο διαφορετικές αλατότητες 20 ppt και 8 ppt. Προπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος. σελ. 46.

Χώτος Γ.Ν. (2001) Ενυδρεία. Τ.Ε.Ι. Μεσολογγίου, Τμήμα Ιχθυοκομίας-Αλιείας, σελ. 89.

Χώτος Γ.Ν. (2007) Υδατοκαλλιέργειες σε Ανακυκλούμενα Νερά. Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Ιχθυοκομίας-Αλιείας, σελ. 210.

5.3 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<https://aquaponics.com/methods-of-aquaponics/>

<https://www.theaquaponicsource.com/starting-up-cycling-an-aquaponics-system-using-fish/>

6. ABSTRACT

Aquaponics is combines aquaculture with hydroponics in a recirculating aquaculture system (RAS) for the production of food products. The aim of the present undergraduate thesis was the design and the conditioning of a brackish aquaponics system for the combined cultivation of sea bream (*Sparus aurata*) and sea fennel (*Chrithmum maritimum*). Six small scale aquaponics systems were constructed under two different salinities 8 and 20 ppt, respectively.

Each aquaponics system consisted of a fish tank (FT) and a plant grow bed tank (GB) (60,5 x 30,5 x 30 cm) with a total volume of 55 L. A sump filter (34 x 26 x 35 cm) with a volume of 30 L was used for each system divided in 3 compartments one for the mechanical filter, one for the biological filter (K1, ceramic rings, bioballs) and one for keeping the pump. All the systems had a water flow rate of 1496 cm³/min and a filter velocity of 2,24 cm/min and an air flow of 1,8 L/min for GB and 0,22 L/min for the FT, respectively. The results of the experiment showed that the nitrogen cycle was completed on the 35th day. The oxidizing capacity of the aquaponics system was measured at 0,54 mg O₂/L. In conclusion, the ideal number of fish for a balanced system as constructed above was 26 fish per system.

Key words: Aquaponics, Recirculation Aquaculture System, Design Aquaponics aquascape, Conditioning

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

