



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΛΙΕΙΑΣ &
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

(Πρόγραμμα σπουδών Τεχνολογίας Αλιείας και Υδατοκαλλιέργειών)

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ο Κύκλος των θρεπτικών σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας υφάλμυρου νερού και η επίδρασή τους στην παραγωγή βιομάζας φυτών και ψαριών»

Γεώργιος Κουτούκης
Επιβλέπων: Νικόλαος Βλάχος

ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ 2020

«Ο Κύκλος των θρεπτικών σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας υφάλμυρου νερού και η επίδρασή τους στην παραγωγή βιομάζας φυτών και ψαριών»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

Νικόλαος Βλάχος, Ε.ΔΙ.Π, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Επιβλέπων.

Κοσμάς Βιδάλης, Καθηγητής, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών , Πανεπιστήμιο Πατρών Μέλος.

Κωνσταντίνος Πούλος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών , Πανεπιστήμιο Πατρών, 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 θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ Νικόλαο Βλάχο επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της παρούσης διπλωματικής προπτυχιακής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές Κοσμά Βιδάλη και Κωνσταντίνο Πούλο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης και συγγραφής της παρούσης προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην ενυδραιοπονία, τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται κυρίως από την τροφή των ψαριών και το νερό που εισέρχεται στο σύστημα του συστήματος. Ένα σημαντικό μέρος της τροφής λαμβάνεται από τα ψάρια και είτε χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό ή απεκκρίνεται σαν υγρά και στερεά κόπρανα, ενώ η υπόλοιπη τροφή που δεν έχει καταναλωθεί αποσυντίθεται στην δεξαμενή. Ενώ τα υγρά απόβλητα είναι άμεσα διαθέσιμα για τα φυτά, τα στερεά χρειάζεται (πρώτα να διασπαστούν από μικροοργανισμούς για να γίνουν τα θρεπτικά διαθέσιμα για τα φυτά). Είναι μεγαλύτερη η πρόκληση να ελέγξεις θρεπτικά στην Ενυδραιοπονία.

Επίσης πολλοί παράγοντες όπως το pH, η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός. Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες έρευνες έχουν εστιάσει στον κύκλο του αζώτου και του φωσφόρου. Όμως προκειμένου να διασφαλιστεί μια καλή σοδιά είναι απαραίτητο να παρέχονται τα βέλτιστα σε όλα τα επίπεδα θρεπτικά. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση και ο έλεγχος του κύκλου των θρεπτικών συστατικών στην ενυδραιοπονία.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδραιοπονία, Θρεπτικά συστατικά, Απορρόφηση θρεπτικών συστατικών, Παραγωγή φυτών, Παραγωγή ψαριών

ABSTRACT

In aquaponics, nutrients originate mainly from the fish feed and water inputs in the system. A substantial part of the feed is ingested by the fish and either used for growth and metabolism or excreted as soluble and solid faeces, while the rest of any uneaten feed decays in the tanks. While the soluble excretions are readily available for the plants, the solid faeces need to be mineralized by microorganisms in order for its nutrient content to be available for plant uptake. It is thus more challenging to control the available nutrient concentrations in aquaponics than in hydroponics.

Furthermore, many factors, amongst others pH, temperature, and light intensity, influence the nutrient availability and plant uptake. Until today, most studies have focused on the nitrogen and phosphorus cycles. However, to ensure good crop yields, it is necessary to provide the plants with sufficient levels of all key nutrients. It is therefore essential to better understand and control nutrient cycles in aquaponics.

Key words: Aquaponics, Cycle of Nutrient, Nutrient absorption, Plant production, Fish production

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 5 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 6 |
| ABSTRACT..... | 7 |
| 1. Εισαγωγή..... | 10 |
| 1.1. Εννοιολογικό περιεχόμενο Ενυδρειοπονίας | 10 |
| 1.2. Τύποι Ενυδρειοπονικών συστημάτων..... | 12 |
| 1.3. Ροή θρεπτικών συστατικών στο σύστημα ενυδρειοπονίας..... | 14 |
| 1.4. Νιτροποίηση- Απονιτροποίηση..... | 17 |
| 1.5. Ψάρια και φυτά που εκτρέφονται και καλλιεργούνται στην Ενυδρειοπονίας | 18 |
| 1.6. Ο ρόλος της ενυδρειοπονίας στην ασφαλή παραγωγή τροφίμων..... | 19 |
| 1.7 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας..... | 21 |
| 2. Λειτουργία και Ρύθμιση Συστήματος Ενυδρειοπονίας..... | 22 |
| 3. Ο Κύκλος των θρεπτικών συστατικών στην Ενυδρειοπονία..... | 28 |
| 3.1. Πηγές προέλευσης του Αζώτου στο σύστημα Ενυδρειοπονίας..... | 28 |
| 3.1.1 Τροφή -υπολείμματα τροφής και κόπρανα..... | 29 |
| 3.2. Βιοχημικές διεργασίες | 31 |
| 3.2.1. Διαλυτοποίηση | 31 |
| 3.2.2. Νιτροποιητικές διεργασίες..... | 32 |
| 4. Ισορροπία Μάζας: Εισροή θρεπτικών συστατικών και Πορεία απορρόφησης τους στο σύστημα Ενυδρειοπονίας..... | 34 |
| 4.1 Γενικό πλαίσιο λειτουργίας..... | 34 |
| 4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τον κύκλο των θρεπτικών | 35 |
| 4.3. Μακροθρεπτικά συστατικά..... | 36 |
| 4.3.1. Ο κύκλος των μακροθρεπτικών συστατικών | 36 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4. Μικροθρεπτικά συστατικά..... | 39 |
| 4.6 Η Δυναμική Ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών στην ενυδραιοπονία | 40 |
| 4.6.1. Δυναμική συστημάτων ισορροπίας θρεπτικών ουσιών | 41 |
| 5. Συμπεράσματα | 43 |
| 6. Βιβλιογραφία | 45 |
| 6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. | |

1. Εισαγωγή

1.1. Εννοιολογικό περιεχόμενο Ενυδραιοπονίας

Η ενυδραιοπονία χαρακτηρίζεται ως μια μέθοδος παραγωγής τροφίμων η οποία συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια με ανακυκλούμενο νερό (RAS), (εκτροφή υδρόβιων ζώων όπως ψάρια, καρκινοειδή, μαλάκια σε δεξαμενές) και την υδροπονία (καλλιέργεια εδώδιμων ή αρωματικών φυτών σε νερό) σε ένα συνδυασμένο σύστημα καλλιέργειας με ανακυκλούμενο νερό όπου, χρησιμοποιεί τον βακτηριακό πληθυσμό για την αξιοποίηση των αποβλήτων των ιχθύων στην θρέψη των φυτών (Somerville et al. 2014).

Ουσιαστικά, το σύστημα Ενυδραιοπονίας λειτουργεί ως συνέργεια μεταξύ των ιχθύων, των φυτών και των βακτηρίων, αξιοποιώντας τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας, χωρίς να απορρίπτει όγκο νερού στο φυσικό αποδέκτη ή να προσθέτει χημικά λιπάσματα κάνοντας τη μία οικολογική βιώσιμη μέθοδο παραγωγής τροφίμων, χωρίς τη χρήση λιπασμάτων.

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η συνεχής χρήση συνθετικών λιπασμάτων με την πάροδο του χρόνου μειώνει την ποικιλομορφία του εδάφους που απαιτείται για την παραγωγή καλλιεργειών (Murugan & Swarnam 2013) και δημιουργεί προκλήσεις όπως ασθένειες που προκαλούνται από το έδαφος, τα ζιζάνια και η υπογονιμότητα του εδάφους, που σχετίζονται με την παραγωγή φυτών επικίνδυνη καλλιέργεια εδάφους και μερικές φορές χαρακτηρίζεται ως ανεπιθύμητη (Rakocy et al. 2006, Lennard 2004 , Ibrionke 2013). Η αυξανόμενη απαίτηση για παραγωγή άριστης ποιότητας τρόφιμα, χωρίς να δημιουργούνται περαιτέρω ζημίες στο φυσικό περιβάλλον, είχε ως αποτέλεσμα να οδηγήσει σε μια διερεύνηση ανάμεσα στα πιο δημοφιλή γεωργικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως η υδατοκαλλιέργεια, η υδροπονία και η ενυδραιοπονία (Kratky 2009).

Το άζωτο (N) και ο φωσφόρος (P) είναι τα βασικά θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται σε υψηλές ποσότητες από τους υδρόβιους ζωικούς οργανισμούς, ιδίως τα ψάρια, για την ανάπτυξή τους (Lam et al. 2015), και από τα φυτά για την παραγωγή τροφής (Schouw & Tjell 2003). Ωστόσο, τα θρεπτικά συστατικά

καθίστανται ολοένα και περισσότερο περιοριστικά στη γεωργία, καθώς αναμένεται ότι στο εγγύς μέλλον θα εξαντληθούν τα φωσφορικά πετρώματα (Bonvin 2013). Παρομοίως, η παραγωγή λιπασμάτων αζώτου από ατμοσφαιρικό N είναι επίσης δαπανηρή (Nyamangara et al. 2009). Ενώ η βιολογική στερέωση N έχει μεγάλες δυνατότητες, η χρήση τους απαιτεί και άλλα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη παραγωγής φυτών (Nyamangara et al. 2009). Εναλλακτικές πηγές αυτών των θρεπτικών συστατικών θα πρέπει να αναζητηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η βιωσιμότητα (Palm et al. 2014).

Στην πλειονότητα της βιβλιογραφίας, αναφέρεται ότι, η καθαρή συγκέντρωση αζώτου (N) και φωσφόρου (P) στα απόβλητα που προέρχονται από την υδατοκαλλιέργεια ισούται με την απαίτηση των θρεπτικών συστατικών των περισσότερων ειδών φυτών όπως των λαχανικών, των λουλουδιών και των βοτάνων, ως εκ τούτου αποτελεί δυνητική πηγή θρεπτικών συστατικών για τα φυτά (Allison 2011). Αυτό πιθανά να δημιουργήσει πρόβλημα και να αυξάνει την επιβάρυνση όταν απορρίπτονται στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, τα απόβλητα της υδατοκαλλιέργειας και η απορροή τους μπορούν να συμβάλουν σε αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τον ευτροφισμό, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την ευημερία των ψαριών (FAO 2015). Ο ευτροφισμός είναι η υπερβολική αύξηση των θρεπτικών συστατικών σε λίμνες ή σε άλλα υδάτινα σώματα, συχνά λόγω αυξημένης εισροής γεωργικών λιπασμάτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα να προκαλεί πυκνή ανάπτυξη στα υδρόβια φυτά (Andersson 2015).

Η Ενυδραιοπονία όπως έχει αναφερθεί συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια και την υδροπονία σε ένα συστήματα παραγωγής (Morshuizen 2013), το οποίο έχει χαρακτηριστεί από τον (FAO 2014) ως λειτουργικό μιας και συνδυάζει αυτά τα δύο συστήματα μαζί. Σύμφωνα με τους (Goddek et al. 2015) η ενυδραιοπονία πολύ δημοφιλής στο εξωτερικό και ιδιαίτερα στην Αυστραλία. Ωστόσο, η ενυδραιοπονία εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται ως ένα νέο και αναπτυσσόμενο παραγωγικό σύστημα στις περισσότερες Αφρικανικές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Νότιας Αφρικής για βελτιστοποίηση της παραγωγής τροφίμων. Προκειμένου να αξιοποιηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα απόβλητα της υδατοκαλλιέργειας, τα υδάτινα οικοσυστήματα σχεδιάστηκαν με διπλό δυνητικό αποτέλεσμα, συμβάλλοντας αφενός μεν στη μείωση των αποβλήτων των ψαριών που δημιουργούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και αφετέρου να χρησιμοποιούν τα απόβλητα που είναι πλούσια σε

θρεπτικά συστατικά για την παραγωγή υγιεινών τροφίμων (Khater et al. 2015, Lam et al. 2015).

Με την ενυδρειοπονία παράγονται ψάρια και λαχανικά ταυτόχρονα μέσω της σύνδεσης των απορριμμάτων των ψαριών σε υδροπονικά ανάπτυξη των φυτών ως φυσικό θρεπτικό συστατικό για την υποστήριξη του κύκλου ζωής των φυτών (Sace & Fitzsimmons 2013, Roosta & Hamidpour 2011). Ανάμεσα στα οφέλη συγκαταλέγονται η χρήση μικρότερου όγκου νερού σε σχέση με τη συμβατική γεωργία και ειδικότερα, επαναχρησιμοποιώντας τα θρεπτικά συστατικά (Munguia-Fragozo et al. 2015). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αντιμετωπισθούν προβλήματα λειψυδρίας και επισιτισμού σε χώρες όπως για παράδειγμα η νότια Αφρική.

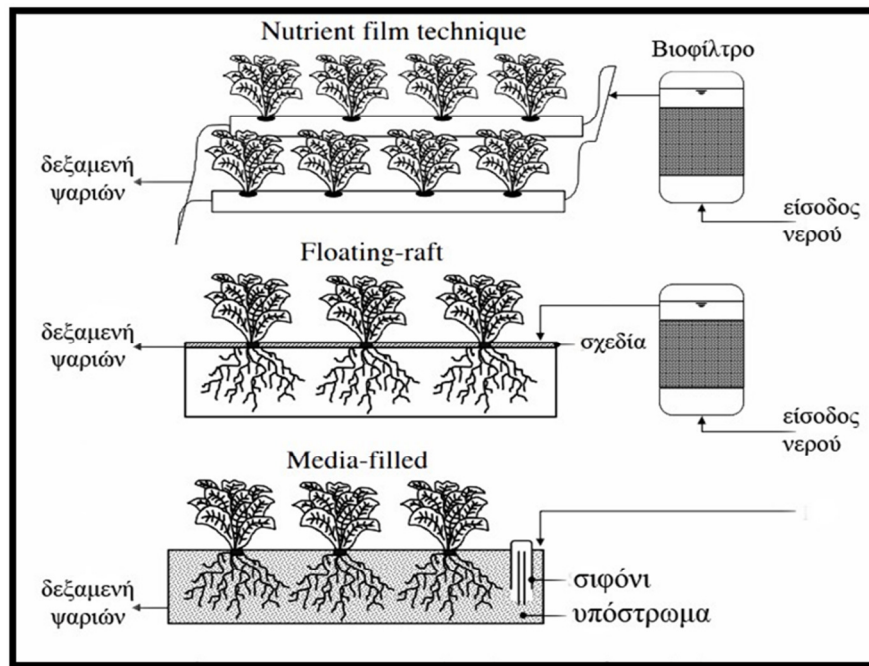
Προκειμένου να προωθηθεί η ανάπτυξη της ενυδρειοπονίας και να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την ευρεία εφαρμογή τους, είναι ζωτικής σημασίας να προσδιοριστούν οι βασικοί μηχανισμοί που ελέγχουν τον κύκλο του αζώτου στο ενυδρειοπονικό σύστημα.

1.2. Τύποι Ενυδρειοπονικών συστημάτων

Ένα τυπικό ενυδρειοπονικό σύστημα αποτελείται από:

- τις δεξαμενές εκτροφής των ψαριών
- το βιοφίλτρο
- τις υδροπονικές δεξαμενές καλλιέργειας των φυτών

Οι συνηθέστεροι τύποι που χρησιμοποιούνται ενυδρειοπονία είναι τρεις και περιγράφονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Τύποι Ενυδρειοπονικών συστημάτων (Πηγή: Wongkiew et al.2017).

Τα συστήματα ενυδρειοπονίας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους (Εικ.1).

- NFT (Nutrient Film Technique) Τεχνική καλλιέργειας σε θρεπτικό υπόστρωμα (NFT)
- Floating – raft, Τεχνική καλλιέργειας σε επιπλέουσα σχεδία (Raft)
- Media-Filled, Τεχνική καλλιέργειας σε υλικό πλήρωσης.

Ο τύπος καλλιέργειας φυτών σε θρεπτικό υπόστρωμα (NFT) παρέχει υψηλή ποσότητα οξυγόνου στις ρίζες των φυτών που συντελεί στην γρήγορη ανάπτυξη τους. Ωστόσο το σύστημα NFT είναι κατάλληλο μόνο για μικρά φυτά επειδή δεν μπορεί να υποστηρίξει μεγάλη ποσότητα ριζών λόγω του δυνητικού περιορισμού της ροής της επανακυκλοφορίας (Wongkiew et al.2017).

Ο τύπος καλλιέργειας σε επιπλέουσα σχεδία (Floating-raft) είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος καλλιέργειας φυτών σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα γιατί επιτρέπει στις ρίζες των φυτών να απορροφούν τα θρεπτικά συστατικά από το νερό χωρίς να περιορίζει ή να μειώνει τη ροή κυκλοφορίας του νερού από τις ρίζες των φυτών. Και οι δύο τεχνικές καλλιέργειας των φυτών (NFT, floating raft) προϋποθέτουν την εγκατάσταση και λειτουργία βιολογικών και μηχανικών φίλτρων

για αποτελεσματικότερη επεξεργασία των αποβλήτων των ψαριών (Wongkiew et al.2017).

Η τεχνική καλλιέργειας των φυτών σε υποστρώματα, (Media-Filled) δεν προϋποθέτει την ύπαρξη και λειτουργία βιολογικών φίλτρων, εξαιτίας του υποστρώματος που χρησιμοποιείται (π.χ. άργιλος τύπου LECA, ελαφρόπετρα κλπ) και παίζει το ρόλο του βιολογικού φίλτρου, με τα νιτροποιητικά βακτήρια να αναπτύσσονται στο υλικό πλήρωσης. Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία της υδροπονικής δεξαμενής των φυτών είναι, η προσθήκη ενός σιφωνίου μέσου του οποίου, επιτυγχάνεται καλύτερη κυκλοφορία του νερού στα φυτά τροφοδοτώντας με οξυγόνο τις ρίζες τους (Wongkiew et al.2017).

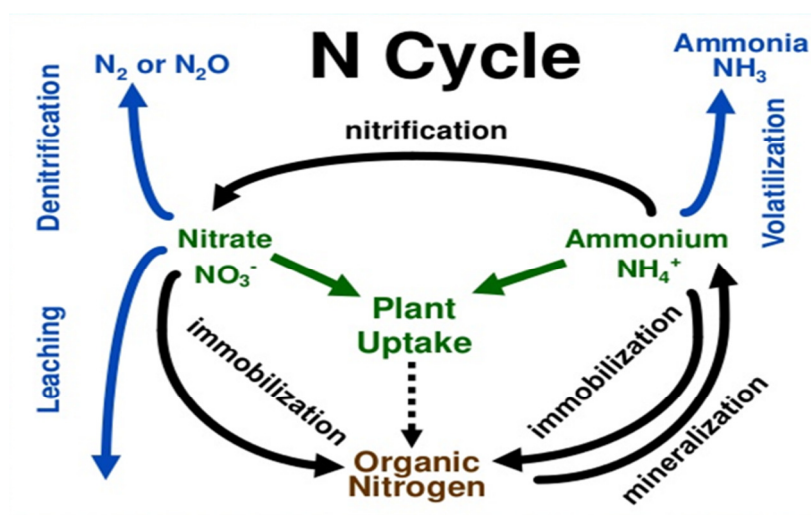
Σύμφωνα με τους Rakocy 2007) το σύστημα ενυδρειοπονίας είναι ένα πολύπλοκο σύστημα το οποίο φαίνεται να έχει αυξημένα λειτουργικά έξοδα για τη διαβίωσή του. Στο σύστημα ενυδρειοπονίας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση του απαιτούν αυξημένες δεξιότητες και γνώσεις (Love et al. 2015). Υπάρχουν τυποποιημένες αρχές που υποστηρίζουν την κοινωνική βιωσιμότητα για την αξιολόγηση και καθοδήγηση κάθε κοινωνικής παρέμβασης για τη βιωσιμότητα, είναι: (α) η ανθρώπινη ασφάλεια και υγεία οι οποίες θα πρέπει να προωθηθούν και να προστατευθούν συνολικά, (β) πρέπει να παρέχεται εκπαίδευση, που να εγγυάται την ατομική ταυτότητα και ανάπτυξη, (γ) Η εκτροφή θα πρέπει να προωθηθεί, μαζί με την προστασία και τη βελτίωση των κοινωνικών προτύπων και πόρων που αποτελούν κοινωνικό κεφάλαιο και τέλος (δ) η αλληλεγγύη πρέπει να προωθηθεί μεταξύ και εντός των γενεών και σε παγκόσμιο επίπεδο (Ochsenbein & Wachter D 2004).

1.3. Ροή θρεπτικών συστατικών στο σύστημα ενυδρειοπονίας

Τα απόβλητα των ψαριών παράγουν σημαντική ποσότητα αμμωνιακού αζώτου και στερεών που είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, τα οποία είναι σημαντικά για την παραγωγή φυτών όταν είναι σε διαλυμένη μορφή (Buzby & Lin (2014). Η διάθεση των αποβλήτων στα φυτά, επηρεάζεται από τη διαδικασία της ανοργανοποίησης (Nyamangara et al. 2009) και περιγράφεται ως η διαδικασία με την οποία η οργανική ύλη διασπάται στο ενυδρειοπονικό περιβάλλον (Hu et al. 2015). Υπάρχουν πέντε κύριοι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την ανοργανοποίηση της

οργανικής ύλης, και καθορίζουν το ρυθμό απελευθέρωσης των θρεπτικών ουσιών στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Οι μηχανισμοί είναι οι εξής: η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση, η παραγωγή οργανικού αζώτου και η πτητικότητα (Rafiee & Saad 2005). Η ανοργανοποίηση πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό και σε διάστημα λιγότερο από μία εβδομάδα (3-7 ημέρες) όταν οι συνθήκες είναι ιδανικές για την αναπαραγωγή και ανάπτυξη των βακτηρίων (Johnson et al. 2005). Οι συνθήκες που ευνοούν τη βέλτιστη ανοργανοποίηση είναι ο αερισμός, η υγρασία, το pH και τα θρεπτικά συστατικά (Lund 2014). Επηρεάζει τη μικροχλωρίδα και τους μηχανισμούς που καθορίζουν το ρυθμό αμμωνιοποίησης στο σύστημα και συνεπώς την ποσότητα που ανοργανοποιείται με την πάροδο του χρόνου (Nyamangara et al. 2009).

Η δραστηριότητα των βακτηρίων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το pH (όχι μικρότερο από 5,5) και αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και του pH. Η μέγιστη ανοργανοποίηση αζώτου-N πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία στο σύστημα κυμαίνεται από 30 °C έως τους 36 °C, ωστόσο, η μείωση της ανοργανοποίησης του αζώτου (N) υποδεικνύει χαμηλή μικροβιακή δραστηριότητα και υποβάθμιση των βιολογικών ιδιοτήτων του μέσου ανάπτυξης (Roosta 2014). Όταν η θερμοκρασία, η υγρασία και το pH είναι ευνοϊκή για το μεταβολισμό των βακτηρίων τότε λαμβάνει χώρα η οργανοποίηση της αμμωνίας, το αντίθετο της διαδικασίας οδηγεί σε ακινητοποίηση (Εικ.2).



Εικόνα 2. Κύκλος του αζώτου και οι βιοχημικές διαδικασίες αμμωνιοποίησης και οργανοποίησης του αζώτου (Πηγή: <https://blog.farmacon.gr>)

1.4. Νιτροποίηση- Απονιτροποίηση

Η νιτροποίηση περιγράφει τις βιοχημικές διεργασίες που περιγράφονται μέσω της οξείδωσης του $\text{NH}_4^+\text{-N}$ σε $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (Rafiee & Saad 2005). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον βέλτιστο ρυθμό νιτροποίησης είναι η υγρασία, ο αερισμός, τα αλκαλικά εύρη pH και η θερμοκρασία (Brummett & Ponzoni 2009). Υπάρχουν δύο είδη βακτηρίων ή μικροοργανισμών που συμβάλλουν στο σχηματισμό $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (νιτροποίηση). Αυτά είναι το *Nitrosomonas europaea* που οξειδώνει το αμμωνιακό άζωτο σε $\text{NO}_2^-\text{-N}$, και το $\text{NO}_2^-\text{-N}$ οξειδώνεται περαιτέρω από το *Nitrobacter winogradskyi* σε $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (Hu et al. 2015). Ωστόσο, η βιοχημική διεργασία της νιτροποίησης αναστέλλεται σε αυξημένη θερμοκρασία, οι υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν στη διαθεσιμότητα N ως αμμωνία-N. Αυτό στη συνέχεια συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της πτητικότητας του αμμωνίου και του μειωμένου ρυθμού νιτροποίησης (Lam et al. 2015), αυτός είναι ο σημαντικός παράγοντας διαχείρισης του συστήματος ενυδρείοπονίας.

Οι βέλτιστες θερμοκρασίες για νιτροποίηση κυμαίνονται μεταξύ 25 ° C έως 30 ° C, το pH είναι 8,5, με το pH να είναι μικρότερο από 5,5 η νιτροποίηση είναι χαμηλή και ασθενής, η οποία αντιπροσωπεύει μικρότερη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών (Liang & Chien 2013). Η νιτροποίηση απαιτεί επαρκή παροχή οξυγόνου, κάτι που είναι πολύ σημαντικός παράγοντας διαχείρισης των υδάτων, καθώς το νερό και τα αιωρούμενα στερεά μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στο σύστημα (FAO 2015). Ο περιορισμένος αερισμός επιβραδύνει τη διεργασία της νιτροποίησης, το οξυγόνο καθορίζει την ταχύτητα και οι μεταβολισμοί αυξάνονται με την αύξηση του οξυγόνου στα βακτήρια (Goddek et al. 2015).

Κατά τη βιοχημική διεργασία της απονιτροποίησης τα $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ανάγονται σε αέριο άζωτο (Johnson et al. 2005). Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε αερόβιες συνθήκες όπου τα βακτήρια λαμβάνουν το οξυγόνο τους από τα $\text{NO}_2^-\text{-N}$ και τα $\text{NO}_3^-\text{-N}$ παράγοντας N_2 και N_2O (Coolong 2012). Οι Περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την εκπομπή οξειδίου του αζώτου σχετίζονται με την επίδραση τους στην καταστροφή του όζοντος (Rafiee & Saad 2005). Το NO προέρχεται από το N_2O το οποίο ως αέριο διαχέεται στην ατμόσφαιρα (Allison 2011). Ως εκ τούτου θα πρέπει να αποφεύγεται η απονιτροποίηση. Έχει αποδεχθεί από τους (FAO 2015). Η κοινή

στρατηγική διαχείριση αποτελεί την επιλογή μιας μεθόδου που θα οδηγεί στην βέλτιστη ανάπτυξη (NFT, GMB και DWC) όπου θα επιτρέπει την κατάλληλη κατάσταση για την ανάπτυξη των βακτηρίων ώστε να αποφευχθεί η βιοχημική διεργασία της απονιτροποίησης (Rakocy et al.2006, Lennard 2004).

1.5. Ψάρια και φυτά που εκτρέφονται και καλλιεργούνται στην Ενυδρειοπονίας

Η ενυδρειοπονία γλυκού νερού είναι η πιο διαδεδομένη και μελετημένη τεχνική παραγωγής τροφίμων με οικολογικό τρόπο. Σύμφωνα όμως με τους Weller et al. (2013), η πιο καινοτόμος και με μεγάλο ενδιαφέρον στρατηγική σε αυτόν τον τομέα είναι η ενυδρειοπονία σε θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό, όπου καλλιεργούνται ευρύαλα είδη ψαριών και αλλόφυτα.

Είδη όπως η κοινή τιλάπια (*Oreochromis niloticus*), η μπλέ τιλάπια (*Oreochromis aureus*), η κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis mossambicus*), το υβρίδιο *O. aureus X O. niloticus*, το υβρίδιο *Oreochromis spp*, η πέστροφα, το αφρικάνικο γατόψαρο, τα κοί και ο κυπρίνος συγκαταλέγονται μεταξύ των ειδών των ιχθύων που χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας με γλυκό νερό (Palm et al. 2014, Endut et al 2011).

Στην θάλασσα ή υφάλμυρη ενυδρειοπονία επιλέγονται είδη ψαριών που μπορούν να εκτραφούν σε συστήματα θαλασσινού νερού (Alessio et al. 2001) και να συμβιώνουν με μεγάλη ποικιλία φυτών (Pantanella & Colla 2013). Η ενυδρειοπονία σε υφάλμυρο νερό συνδυάζει την εκτροφή Μεσογειακών ευρύαλων ειδών όπως η τσιπούρα (Vlahos et al. 2019) ή το λαβράκι σε συνδυασμό με μεγάλη ποικιλία Μεσογειακών φυτών όπως τα αλόφυτα (κρίταμος) (Vlahos et al. 2019) ή φύκη (Boxman 2015), τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη εμπορική αξία (Fronte et al. 2016, Nozzi et al.2016).

Τα είδη φυτών που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε συστήματα ενυδρειοπονίας με επιτυχία είναι: η τομάτα, το μαρούλι, ο βασιλικός, η πιπεριά, το σπανάκι και η μελιτζάνα (Endut et al. 2009, Palm et al. 2014), ενώ στα είδη των φυτών που αναπτύσσονται σε αλατότητα 5 ppt (Ayers &Wescott 1989) είναι τα αλόφυτα. Ανάμεσα στα είδη αλόφυτων που καλλιεργούνται για την παραγωγή

λαχανικών συγκαταλέγονται ο κρίταμος (rock samphire, *Chrithmum maritimum*), πολλά είδη του γένους *Salicornia* και η κινόα (*Quinoa sp*) (Somerville et al. 2014, Pantanella & Bhujel 2015).

Επίσης, η θαλάσσια ή υφάλμυρη ενυδραιοπονία εφαρμόζεται σε καλλιέργειες οπωροκηπευτικών χρησιμοποιώντας υφάλμυρο νερό (5-30 g/L) (Pantanella 2012b). Πολλά από αυτά τα είδη ανήκουν στην οικογένεια *Chenopodiaceae*, όπως για παράδειγμα το τεύτλο *Beta vulgaris* ή τα *Beta vulgaris var cycles* και αναπτύσσονται χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα σε αλατότητα 3,5-7 g/L. Άλλα είδη, όπως η κοινή ντομάτα (*Lycopersicon esculentum*), ο βασιλικός (*Ocimum basilicum*) μπορούν να αναπτυχθούν σε αλατότητες με περιεκτικότητα σε αλάτι 4g /L (Pantanella & Bhujel 2015). Η ενσωμάτωση της καλλιέργειας των φυκών στην θαλάσσια ενυδραιοπονία αποτελούν επίσης μια αξιολογη εναλλακτική λύση (Pantanella & Bhujel 2015). Μεταξύ των διαφόρων ειδών φυκών αξιοσημείωτο ενδιαφέρον, παρουσιάζουν η σπιρουλίνα (*Arthospira platensis*) και η chlorella (*Chlorella spp*).

Ο Main (2015), αναφέρουν ότι είδη ιχθύων όπως το *Sciaenops ocellatus* και το *Trachinotus carolinus* μπορούν να εκτραφούν σε συνδυασμό με τα είδη φυτών *Spartina alterniflora* (σπαρτίνα Αμερικής), το *Juncus romerianus* (μαύρη βελόνα) και το είδος *Rhizophora mangle* (κόκκινο μαγκρόβιο). Οι Boxman et al. (2015) καλλιέργησαν δύο είδη αλοφύτων, το *Batis maritima* και το *Sesuvium portulacastrum* σε συνδυασμό με το είδος *Sciaenops ocellatus* σε θαλάσσια ενυδραιοπονία. Τέλος οι Vlahos et al. (2019) καλλιέργησαν το αλόφυτο *Crithmum maritimum* (κρίταμος) με την χρήση της τσιπούρας (*Sparus aurata*) σε υφάλμυρο σύστημα ενυδραιοπονίας, με αλατότητες 8ppt και 20ppt.

1.6. Ο ρόλος της ενυδραιοπονίας στην ασφαλή παραγωγή τροφίμων

Η επισιτιστική ασφάλεια υπάρχει όταν η πλειοψηφία των ανθρώπων ανά την υφήλιο, ανά πάσα στιγμή, έχουν φυσική και οικονομική πρόσβαση σε επαρκή, ασφαλή και θρεπτικά τρόφιμα που να ικανοποιούν τις διατροφικές τους ανάγκες και τις προτιμήσεις τους για μια δραστήρια και υγιή ζωή (Allison 2011). Υπάρχουν τέσσερις πυλώνες επισιτιστικής ασφάλειας που ορίζουν, υπερασπίζονται και μετρούν την κατάσταση της επισιτιστικής ασφάλειας σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο.

Πρόκειται για διαθεσιμότητα τροφίμων, προσβασιμότητα τροφίμων, χρήση τροφίμων και σταθερότητα τροφίμων (Drangert 1998).

Η διαθεσιμότητα των τροφίμων επιτυγχάνεται όταν τα θρεπτικά τρόφιμα είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή για να έχουν πρόσβαση οι άνθρωποι. Η προσβασιμότητα στα τρόφιμα επιτυγχάνεται όταν οι άνθρωποι έχουν πάντα οικονομική δυνατότητα να αποκτήσουν θρεπτικά τρόφιμα διαθέσιμα σύμφωνα με τις διατροφικές τους προτιμήσεις. Η χρήση τροφίμων επιτυγχάνεται όταν όλα τα τρόφιμα που καταναλώνονται απορροφώνται και χρησιμοποιούνται από τον οργανισμό για να κάνουν υγιή ενεργό ζωή, η σταθερότητα των τροφίμων επιτυγχάνεται όταν επιτυγχάνονται άλλοι πυλώνες (Faber et al.2011).

Η ασφαλή παραγωγή τροφίμων, με μεθόδους προσφιλής στο περιβάλλον, παρέχεται διαμέσου του συστήματος ενυδρειοπονίας επειδή, παράγει ψάρια και λαχανικά ταυτόχρονα, και μπορεί να εφαρμοστεί από κατοίκους μιας περιοχής, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτό την παραγωγή τροφίμων. Τα ψάρια αποτελούν μια σημαντική πηγή πρωτεϊνών, βασικών αμινοξέων και βιταμινών, και μπορούν να επιλύσουν επισιτιστικά προβλήματα (FAO 2015). Ακόμη και σε μικρές ποσότητες, τα ψάρια μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα της διατροφής λαμβάνοντας τα απαραίτητα αμινοξέα που συχνά απουσιάζουν ή απαντώνται σε ελλειμματικές τιμές σε φυτικές διατροφές (FAO 2014). Εκτός από τις πρωτεΐνες, τα ιχθυέλαια είναι η προσοδοφόρα πηγή ω3 λιπαρών οξέων τα είναι πιο σημαντικά για τη φυσιολογική ανάπτυξη του εγκεφάλου σε αγέννητα μωρά και βρέφη (USAID 2013). Από αυτήν την άποψη, τα συστήματα ενυδρειοπονίας θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, ψαριών και λαχανικών, η οποία είναι ιδιαίτερα βολική για ενίσχυση, της ασφάλειας των τροφίμων, ιδίως σε περιοχές όπως η νότια Αφρική (Faber et al.2011).

Ωστόσο, η τεχνολογία που σχετίζεται με τα συστήματα ενυδρειοπονίας, είναι περίπλοκη (FAO 2014). Απαιτεί τη δυνατότητα ταυτόχρονης διαχείρισης της παραγωγής και εμπορίας δύο διαφορετικών προϊόντων. Ως εκ τούτου, μια επιτυχημένη επιχείρηση ενυδρειοπονίας απαιτεί ειδική εκπαίδευση, δεξιότητες ή ένα εύχρηστο σύστημα ελέγχου υπολογιστή (Lennard 2004), (Rakocy 2007). Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθεί η χρησιμότητα του κύκλου των θρεπτικών στην Ενυδρειοπονία (Seawright et al. 1998).

1.7 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

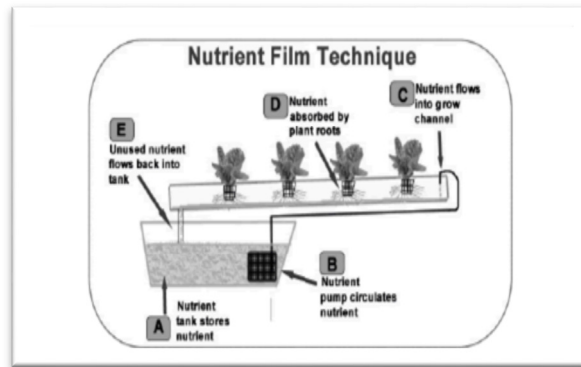
Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής προπτυχιακής εργασίας είναι να αναλύσει τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών σε ένα σύστημα Ενυδρειοπονίας καθώς και να αναλύσει τους μηχανισμούς δράσης τους για την παραγωγή φυτών και ψαριών.

2. Λειτουργία και Ρύθμιση Συστήματος Ενυδραιοπονίας

Τα συστήματα Ενυδραιοπονίας προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα που εστιάζουν στην παραγωγή τροφής με καινοτόμους και βιώσιμους τρόπους (Εκτός από τα συνεργατικά αποτελέσματα με την κατανάλωση της συγκέντρωσης CO₂ για το φαινόμενο του θερμοκηπίου ενώ ταυτόχρονα η συνδυασμένη καλλιέργεια ψαριών και φυτών στον ίδιο χώρο) (Körner et al. 2017). Τα βασικά πλεονεκτήματα της Ενυδραιοπονίας εστιάζουν στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών.

Αρχικά, ο συνδυασμός ενός ανακυκλούμενου συστήματος εκτροφής ψαριών (RAS) με την υδροπονική παραγωγή φυτών περιορίζει κατά πολύ την επιβάρυνση που δημιουργείται από διαλυμένο άζωτο και το φώσφορο σε σχέση με τα ήδη επιβαρυνόμενα υπόγεια νερά (Buzby & Lin 2014, Guangzhi 2001, van Rijn 2013) και δεύτερον βοηθάει στην ανάπτυξη-πολλαπλασιασμό των φυτών και χαρακτηρίζεται ως οργανική παραγωγή (Goddek et al. 2015, Schneider et al. 2004, Yogeve et al. 2016), αντί της χρήσης λιπασμάτων ορυκτής προέλευσης που κατασκευάζονται κυρίως από την εξάντληση των φυσικών πόρων (Schmautz et al. 2016).

Επίσης, σ' ένα σύστημα ενυδραιοπονίας η απόδοση στην ανάπτυξη των φυτών σε σύγκριση με συμβατική υδροπονία παρόλο τη μικρή συγκέντρωση των θρεπτικών που υπάρχει στο νερό της υδατοκαλλιέργειας (Graber & Junge 2009, Bittsanszky et al. 2016, Delaide et al. 2016) ενώ η παραγωγή μπορεί να είναι καλύτερη σε σχέση με εκείνη του εδάφους (Rakocy et al. 2004) που αποδίδεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις σε CO₂ στον αέρα και στις αλλαγές στην περιοχή των ριζών (Εικ.3). Επιπροσθέτως η θρεπτική ποιότητα της τομάτας που αναπτύσσεται σε υδροπονική καλλιέργεια παρατηρήθηκε ότι είναι παρόμοιες ή και μεγαλύτερες από τις τομάτες που αναπτύσσονται στο έδαφος (Schmautz et al. 2016).



Εικόνα 3. (α) NFT σύστημα ενυδρείοπονίας με την ανακύκλωση των θρεπτικών να γίνεται διαμέσου του ριζικού συστήματος των φυτών (Πηγή: Shrethsa 2010).

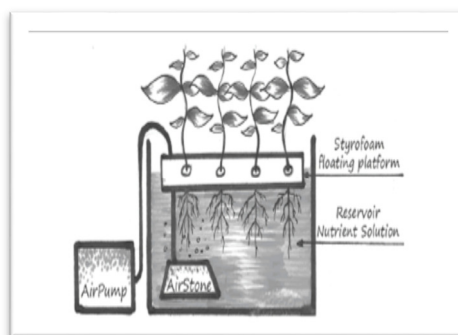
Τα απόβλητα της υδατοκαλλιέργειας αυξάνουν το βαθμό δυσκολίας παρακολούθησης των θρεπτικών συστατικών στο νερό της καλλιέργειας. Ο έλεγχος της σύστασης των θρεπτικών δυσκολεύει μιας και τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται από τη βιολογική αποσύνθεση της οργανικής ύλης σε σχέση με εκείνον που πραγματοποιείται στη συμβατική καλλιέργεια στο έδαφος (Bittsanszky et al.2016, Timmons & Ebeling 2013).

Επιπλέον οι θρεπτικές ανάγκες των φυτών διαφέρουν κατά την διάρκεια της περιόδου που αυξάνει (σύμφωνα με τα στάδια ανάπτυξης) και είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε αυτές τις απαιτήσεις ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση (Bugbee 2004, Zekki et al. 1996).

Προκειμένου να ανακυκλωθούν απόβλητα που προέρχονται από την υδατοκαλλιέργεια και να παραχθεί ικανοποιητική βιομάζα φυτών είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση του ρυθμού ανακύκλωσης του συστήματος παραγωγής του φωσφόρου και του αζώτου(Goddek et al. 2016, Graber & Junge 2009). Παράγοντες που μπορούν να επηρεάζουν τη διαδικασία αυτή είναι :

- 1) το είδος του ψαριού
- 2) η πυκνότητα εκτροφής
- 3) η θερμοκρασία του νερού
- 4) ο τύπος του φυτού και η μικροχλωρίδα

Στα περισσότερα συστήματα καλλιέργειας προστίθενται θρεπτικά ως συμπλήρωμα θρεπτικών προκειμένου να διασφαλισθεί ότι καλύπτονται οι θρεπτικές απαιτήσεις των φυτών (Goddek et al. 2015). Πράγματι ακόμη και όταν το σύστημα ενυδρειοπονίας είναι απλό (coupled) (Εικ.4) σύστημα είναι πιθανόν να προστίθενται θρεπτικά για παράδειγμα σίδηρο και κάλιο (τα οποία συνήθως απουσιάζουν) χωρίς να προκαλεί προβλήματα στα ψάρια (Schmautz et al. 2016).



Εικόνα 4. Ενυδρειοπονικό σύστημα με τη μέθοδο της επιπλέουσας σχεδίας όπου τα φυτά αναπτύσσονται εξαιτίας των θρεπτικών συστατικών (Πηγή: Shrethsa 2010).

Η ενυδρειοπονία είναι μια εναλλακτική μέθοδος παραγωγής τροφίμων προς την κατεύθυνση της γεωργικής πρακτικής και αειφορίας. Συνδυάζει την υδροπονία και την υδατοκαλλιέργεια σε κλειστού κυκλώματος συστήματα με ανακυκλοφορία νερού (Ebeling & Timmons 2012) ενώ εφαρμόζει τεχνικές και διαδικασίες που αποσκοπούν στην παραγωγή βιο-ασφαλών τροφίμων, επιχειρώντας την κάλυψη των τροφικών αναγκών του πληθυσμού και ελαχιστοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μέσω της μείωσης του περιβαλλοντικού φορτίου (Somerville et al. 2014).

Η ανάπτυξη των φυτών στην ενυδρειοπονία στηρίζεται στα μεταβολικά προϊόντα των ψαριών, τα οποία χρησιμοποιούνται ως θρεπτικά συστατικά από τα φυτά για την ανάπτυξή τους (Somerville et al. 2014). Πιο συγκεκριμένα η ενυδρειοπονία χρησιμοποιεί με κατάλληλο τρόπο τα απεκκρίματα των ψαριών και τα υπολείμματα της τροφής τους κατά την παραγωγική διαδικασία έτσι ώστε να μην χρησιμοποιούνται χημικά λιπάσματα για την διατροφή των φυτών, ούτε να απορρίπτονται όγκοι νερού και διηθήματα στο περιβάλλον (Somerville et al. 2014).

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος ενυδρείοπονίας στηρίζεται στα μεταβολικά προϊόντα των ιχθύων καθώς και στα υπολείμματα της τροφής τους τα οποία μέσω της βιοχημικής διεργασίας της νιτροποίησης οξειδώνονται σε μη τοξικά παράγωγα τα οποία αξιοποιούνται/καταναλώνονται από τα φυτά (Alessio et al. 2001, Fronte et al. 2016).

Πιο συγκεκριμένα, οι τοξικοί μεταβολιτές (αμμωνία και νιτρώδη ιόντα) μετατρέπονται σε νιτρικά ιόντα, αφού δεν είναι επιβλαβή για τα ψάρια και αφομοιώνονται σε ποσοστό 97% από τα φυτά, ώστε να καλύψουν την θρέψη τους και τις διατροφικές τους απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά (Yildiz et al. 2017). Συνεπώς, το μέσο καλλιέργειας (νερό) που χρησιμοποιεί ένα σύστημα ενυδρείοπονίας είναι εμπλουτισμένο με θρεπτικά συστατικά (νιτρικά ιόντα, φωσφορικά ιόντα κ.α.) και μέσω της συνεχόμενης ανακυκλοφορίας του, πραγματοποιείται απορρόφηση τους από τις ρίζες των φυτών, σαν φυσικό λίπασμα γι' αυτά (Somerville et al. 2014).

Σύμφωνα με τον Lennard (2006), αυτή η διαδικασία συνίσταται ως μια πρακτική τεχνική που χρησιμοποιείται για την απονιτροποίηση του νερού στις δεξαμενές των ιχθύων σε ένα κλειστό σύστημα εκτροφής ιχθύων (recirculated aquaculture system, RAS). Στην παραπάνω βιοχημική διεργασία οξείδωσης της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα σημαντικό ρόλο παίζουν τα νιτροποιητικά βακτήρια (Somerville et al. 2014, Fronte et al. 2016).

Συμπερασματικά, η επιτυχής και ισορροπημένη λειτουργία ενός συστήματος ενυδρείοπονίας εξαρτάται από την ημερήσια παραγωγή αμμωνίας από τους ιχθύες, ως αποτέλεσμα των υπολειμμάτων της μη καταναλώσιμης τροφής τους και της μεταβολικής δραστηριότητάς τους, καθώς και από τη συνολική βιομάζα των ιχθύων που υπάρχουν στο σύστημα. Ο ρυθμός παραγωγής της αμμωνίας εξαρτάται από την ημερήσια χορηγούμενη ποσότητα τροφής και υπολογίζεται ως ποσοστό επί του ζώντος βάρους ιχθύων, την περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη καθώς και τον αριθμό των περασμάτων του νερού από το βιολογικό φίλτρο (ρυθμός επανακυκλοφορίας).

Η επιτυχής ανάπτυξη του φυτού από την άλλη πλευρά, εξαρτάται από τον ημερήσιο ρυθμό παραγωγής αμμωνίας και διαφοροποιείται σύμφωνα με το είδος και τις διατροφικές απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά συστατικά που θα τοποθετηθούν στο σύστημα καλλιέργειας (Somerville et al. 2014). Για παράδειγμα για την ασφαλή ανάπτυξή τους:

- τα φυλλώδη λαχανικά απαιτούν 20-50 gr τροφής/m²/ημέρα
- τα καρποφόρα λαχανικά απαιτούν 50–80 gr τροφής /m²/ημέρα

Επιπροσθέτως, η ημερήσια παρακολούθηση ψαριών και φυτών αποσκοπεί στην εξασφάλιση της ευζωίας των οργανισμών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία και θεωρείται πολύ σημαντική για να είναι το σύστημα ισορροπημένο. Ασθένειες, θνησιμότητες και οι διατροφικές ελλείψεις είναι απόρροια ενός μη ισορροπημένου συστήματος. Η εύρυθμη λειτουργία ενός συστήματος ενυδρειοπονίας προϋποθέτει τον τακτικό έλεγχο της ισορροπίας του συστήματος, μέσω του ελέγχου των επιπέδων αζώτου στα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού από τη δεξαμενή υδροπονικής καλλιέργειας των φυτών και τη δεξαμενή εκτροφής των ιχθύων.

Βασική προϋπόθεση είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ώστε να μπορούν να αντιμετωπισθούν σε εύλογο διάστημα τυχόν καταστάσεις, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη διατάραξη της ισορροπίας του συστήματος, όπως για παράδειγμα:

- υψηλές τιμές νιτρικών ιόντων ή αμμωνίας, ερμηνεύονται ως ανεπάρκεια βιολογικής επεξεργασίας.
- χαμηλά επίπεδα νιτρικών ιόντων (<80 mg/L), ερμηνεύονται ως ελάχιστη παροχή τροφής, μικρός αριθμός ψαριών ή μεγάλος αριθμός φυτών.
- υψηλά επίπεδα νιτρικών ιόντων (>150 mg/L), ερμηνεύονται ως υψηλή παροχή τροφής για τα φυτά με αποτέλεσμα να μην απορροφώνται σε ικανοποιητικό βαθμό.

Οι Vlahos et al. (2019) αναφέρουν ότι, σε ένα κλειστού κυκλώματος συστήματος ενυδρειοπονίας με ανακυκλοφορία νερού η ανανέωση με φρέσκο θαλασσινό ή γλυκό νερό είναι της τάξης του 10% μιας και το 90% του νερού επαναχρησιμοποιείται και η συνεχόμενη επανακυκλοφορία του νερού στοχεύει στην επαναρύθμιση του συστήματος και στον διαρκή εμπλουτισμό του νερού με διαλυμένο οξυγόνο. Η επαναρύθμιση του συστήματος στοχεύει στη διατήρηση των χημικών και φυσικών διαδικασιών που καθιστούν την καταλληλότητα του νερού για την ασφαλή διαβίωση και ανάπτυξη φυτών και ιχθύων.

Η επιτυχής λειτουργία ενός ισορροπημένου κλειστού κυκλώματος συστήματος ενυδρειοπονίας με ανακυκλοφορία νερού εξαρτάται από παραμέτρους όπως:

- Περιβαλλοντικοί παράγοντες (όπως διαλυμένο οξυγόνο, pH, θερμοκρασία αλκαλικότητα)
- Υδραυλικό φορτίο και υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού στο φίλτρο
- Ασφαλή ανάπτυξη βακτηρίων στο σύστημα
- Εισαγωγή θρεπτικών στο σύστημα (λόγος C/N, περιεκτικότητα τροφής σε N)
- Απομάκρυνση στερεών υπολειμμάτων (κόπρανα και υπολείμματα τροφής)
- Οξειδωτική ικανότητα φίλτρου
- Διαχείριση συστήματος

Ωστόσο, οι οργανισμοί που συνυπάρχουν σε ένα σύστημα ενυδρείου έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και ως εκ τούτου απαιτείται προσοχή προκειμένου να επιτευχθεί η ισορροπία στο σύστημα καλλιέργειας. Οι ιχθύες, τα φυτά και τα βακτήρια, χαρακτηρίζονται από διαφορετικά βέλτιστα επίπεδα των προαναφερόμενων παραγόντων, ακόμη και αν τα εύρη ανοχής τους, σε αυτούς, είναι παρόμοια.

3. Ο Κύκλος των θρεπτικών συστατικών στην Ευδραιοπονία

3.1. Πηγές προέλευσης του Αζώτου στο σύστημα Ευδραιοπονίας

Η κύρια πηγή των θρεπτικών στο σύστημα Ευδραιοπονίας είναι η τροφή των ψαριών και τα συμπληρώματα (Mg, Ca, S) που προστίθενται στο νερό του συστήματος (Delaide et al. 2017, Schmautz et al. 2016). Όσον αφορά τις ζωοτροφές υπάρχουν 2 κατηγορίες τροφών που χρησιμοποιούνται: αυτές που βασίζονται σε ζωικής προέλευσης πρωτεΐνη (ιχθυάλευρα) και σε αυτές που βασίζονται σε φυτικής προέλευσης πρωτεΐνη (φυτικά άλευρα).

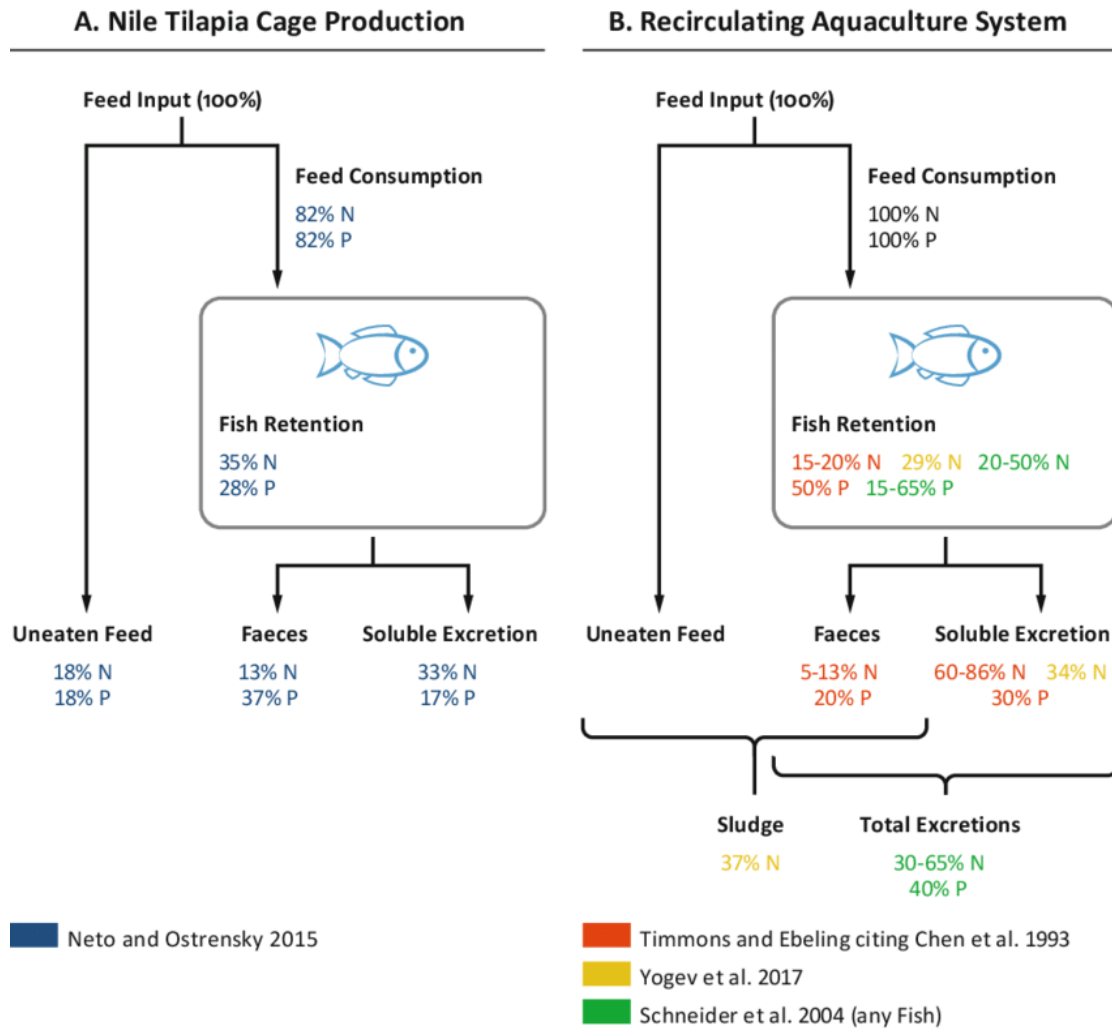
Οι τροφές που βασίζονται στις ζωικές πρωτεΐνες είναι αυτές που κατά κόρον χρησιμοποιούνται στην υδατοκαλλιέργεια όπου οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια προέρχονται αντίστοιχα από τα ιχθυάλευρα και ιχθυέλαια (Geay et al. 2011). Υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την (βιωσιμότητα) των τροφών αυτών έχουν μεγαλώσει και η προσοχή στράφηκε στις φυτικές τροφές (Boyd 2015, Davidson et al. 2013, Hua & Bureau 2012, Tacon & Metian 2008).

Οι Hua & Bureau (2012) έδειξε ότι η χρήση φυτικών πρωτεϊνών στο ψάρι μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του ψαριού αν χορηγηθεί σε μεγάλες ποσότητες. Οι φυτικές πρωτεΐνες επηρεάζουν την πεπτικότητα της τροφής. Συγκεκριμένα, ο φωσφόρος που προέρχεται από φυτά και έτσι με τη μορφή φυτικών δεν τα ωφελεί, για παράδειγμα ο σολομός και άλλα είδη ψαριών (Timmons & Ebeling 2013). Δεν προκαλεί έκπληξη ότι η παρατήρηση εξαρτάται από το είδος του ψαριού και την ποιότητα των συστατικών (Hua & Bureau 2012). Εντούτοις, ελάχιστα γνωρίζουμε για τις επιδράσεις-επιπτώσεις της σύστασης της τροφής στην συγκομιδή των φυτών (Yildiz et al. 2017).

Η συμβατική τροφή των ψαριών αποτελείται από 6-8 μάκρο συστατικά και περιέχει 6-8% οργανικό άζωτο, 1.2% οργανικό φώσφορο και 40-45% οργανικό άνθρακα (Timmons & Ebeling 2013) και περίπου 25% πρωτεΐνη για τα φυτοφάγα ή παμφάγα ψάρια και περίπου 55% πρωτεΐνη για τα σαρκοφάγα ψάρια (Boyd 2015). Τα λιπίδια προέρχονται κατά βάση από ιχθυέλαια ή ορισμένα φυτά (Boyd 2015).

Όταν η τροφή των ψαριών προστεθεί στο σύστημα ένα σημαντικό ποσοστό καταναλώνεται από τα ψάρια και είτε θα χρησιμοποιηθεί για τον μεταβολισμό και

την ανάπτυξή του, είτε απεκκρίνεται ως υγρά απόβλητα και στερεά κόπρανα ενώ η υπόλοιπη τροφή θα διαλυθεί στον πυθμένα της δεξαμενής (Εικ.5) (Goddek et al. 2015, Schneider et al. 2004). Στην περίπτωσή μας τα υπολείμματα της τροφής και τα απόβλητα του μεταβολισμού διαλύονται εν μέρη στο νερό aquaponic. Έτσι επιτρέπουν στα φυτά να προσλαμβάνουν τα θρεπτικά κατευθείαν από το νερό του συστήματος ενυδρειοπονίας (Schmautz et al. 2016).



Εικόνα 5. Ποσοστιαίο διάγραμμα ροής αζώτου και Φωσφόρου (α) Παραγωγή τιλάπιας σε κλωβούς και (β) Παραγωγή σε ανακυκλούμενο σύστημα εκτροφής. (Πηγή: Eck et al. 2019).

3.1.1 Τροφή -υπολείμματα τροφής και κόπρανα

Ιδανικά όλη η τροφή που χορηγείται θα πρέπει να καταναλώνεται από τα

ψάρια. Όμως ένα μικρό μέρος (μικρότερο από το 5%) (Yogev et al. 2016) αφήνεται συνήθως να αποσυντεθεί μέσα στο σύστημα και συνεισφέρει στην αύξηση του θρεπτικού φορτίου του νερού (Losordo et al. 1998, Roosta & Hamidpour 2013, Schmutz et al. 2016). Συνεπώς καταναλώνοντας διαλυμένο οξυγόνο μεταξύ άλλων απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία (Losordo et al. 1998). Τα υπολείμματα της τροφής του ψαριού εξαρτώνται από την σύσταση της τροφής.

Η σύσταση τη τροφής να εξαρτάται από την δίαιτα του ψαριού η οποία επηρεάζει την ποιότητα του νερού (Buzby & Lin 2014, Goddek et al. 2015). Η διατήρηση ή η αύξηση της βιομάζα των ψαριών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του ψαριού, το επίπεδο διατροφής, το μέγεθος του ψαριού και το θερμοκρασία του σύστημα εκτροφής (Schneider et al. 2004).

Για παράδειγμα όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία ο μεταβολισμός των ψαριών επιταχύνεται με αποτέλεσμα περισσότερα θρεπτικά συστατικά να περιέχονται στο στερεό κλάσμα των κοπράνων (Turcios & Papenbrock 2014).

Η αναλογία των θρεπτικών ουσιών που απεκκρίνονται εξαρτάται από την ποιότητα και την πεπτικότητα της τροφής (Buzby & Lin 2014). Η πεπτικότητα της τροφής, το μέγεθος των κοπράνων (και το πόσο γρήγορα καθιζάνει η τροφή) πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν προκειμένου να διασφαλισθεί μια καλή αναλογία στο σύστημα ώστε να οδηγηθεί στην βέλτιστη ανάπτυξη (Yildiz et al. 2017). Πράγματι, η επιλογή της ιχθυοτροφής θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και με μοναδικό κριτήριο να καλύπτει τις θρεπτικές απαιτήσεις των ψαριών και κατ' επέκταση των φυτών ως προς την περιεκτικότητα της σε άζωτο (Goddek et al. 2015, Licamele 2009, Seawright et al. 1998).

Είναι λογικό η σύνθεση τη τροφής να εξαρτάται από την δίαιτα του ψαριού η οποία έχει αντίκτυπο στην ποιότητα του νερού (Buzby and Lin 2014; Goddek et al. 2015). Όμως τα θρεπτικά μένουν στην βιομάζα του ψαριού αλλά αυτό εξαρτάται πολύ από το είδος του ψαριού, την ποσότητα τροφής, την σύνθεση της τροφής, το μέγεθος του ψαριού και την θερμοκρασία που επικρατεί στο σύστημα (Schneider et al. 2004). Για παράδειγμα όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία ο μεταβολισμός του ψαριού επιταχύνεται και έτσι περισσότερα θρεπτικά μένουν στην στερεά μορφή των απεκκρίσεων (Turcios & Papenbrock 2014). Η αναλογία των θρεπτικών ουσιών που απεκκρίνονται επίσης εξαρτάται από την ποιότητα και την πεπτικότητα της τροφής (Buzby & Lin 2014).

Η πεπτικότητα της τροφής, το μέγεθος των κοπράνων (και το πόσο γρήγορα κατακάθεται η τροφή) πρέπει να τα πάρουμε σοβαρά στα υπόψιν για να διασφαλίσουμε μια καλή αναλογία στο σύστημα ώστε να έχουμε την βέλτιστη ανάπτυξη (Yildiz et al. 2017). Πράγματι καθώς έχει προτεραιότητα η τροφή του ψαριού να ταιριάζει στην δίαιτά του έτσι πρέπει να διαλέξουμε και για τις ανάγκες των φυτών (όταν δεν έχει καμιά διάφορα για τα ψάρια), (Goddek et al. 2015, Licamele 2009, Seawright et al. 1998).

3.2. Βιοχημικές διεργασίες

3.2.1. Διαλυτοποίηση

Ως Διαλυτοποίηση περιγράφεται η διαδικασία με την οποία διασπώνται τα σύνθετα οργανικά μόρια που συνθέτουν τα απόβλητα του ψαριού και τα υπολείμματα τροφή σε θρεπτικά σε ιοντική μορφή όπου τα φυτά μπορούν να τα απορροφήσουν (Goddek et al. 2015, Somerville et al. 2014).

Στην ενυδρειοπονία η διαλυτοποίηση συνδέεται κυρίως με τα ετερότροφα βακτήρια (van Rijn 2013) τα οποία δεν έχουν ταυτοποιηθεί πλήρως (Goddek et al. 2015). Μελέτες έχουν αρχίσει να αποκρυπτογραφούν την πολυπλοκότητα αυτών των βακτηρίων (Schmautz et al. 2017). Στην ενυδρειοπονία τα πιο κοινά βακτήρια που απαντώνται στο νερό είναι τα *Rhizobium sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Sphingobacterium sp.*, *Comamonas sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Aeromonas sp.* and *Pseudomonas sp.* (Munguia-Fragozo et al. 2015, Sugita et al. 2005).

Ένα παράδειγμα για τον σημαντικό ρόλο των βακτηρίων στην ενυδρειοπονία μπορεί να είναι η μετασχηματισμός των αδιάλυτων φυτικών σε φώσφορο (P) διαθέσιμο για να το απορροφήσουν τα φυτά μέσω της διαδικασίας της φωσφατάσης η οποία είναι παρούσα στα γ-πρωτεοβακτήρια (Jorquera et al. 2008). Άλλα θρεπτικά εκτός από το φώσφορο μπορούν να παγιδευτούν σαν στερεά και να απομακρυνθούν από το σύστημα ως λάσπη. Προσπάθειες έχουν γίνει ώστε να επαναμεταλλοποιηθεί η λάσπη τη μέθοδο των αναερόβιων αντιδραστήρων UASB-EGSB με σκοπό τα θρεπτικά να εισέρχονται εκ νέου στο ενυδρειοπονικό σύστημα (Delaidie 2017, Goddek et al. 2016). Ακόμα τα διαφορετικά μεταλλικά στοιχεία δεν απελευθερώνονται με τον ίδιο ρυθμό και εξαρτάται από την σύνθεση της τροφής (LetelierGordo et al. 2015). Έτσι αυτό μας οδηγεί σε πιο περίπλοκη παρακολούθηση

των συγκεντρώσεων των θρεπτικών σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα (Seawright et al. 1998).

3.2.2. Νιτροποιητικές διεργασίες

Η κύρια πηγή αζώτου σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα είναι η τροφή των ψαριών και οι πρωτεΐνες που περιέχει (Goddek et al. 2015, Ru et al. 2017, Wongkiew et al. 2017, Yildiz et al. 2017). Ιδανικά το 100% αυτής της τροφής θα πρέπει να καταναλώνεται από τα ψάρια. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι το ψάρι καταναλώνει το 30% του αζώτου που περιέχει η τροφή και παρέχεται διαμέσου της τροφής σε αυτό (Rafiee & Saad 2005).

Η καταναλωθείσα τροφή χρησιμοποιείται εν μέρει για αφομοίωση και μεταβολισμό (Wongkiew et al. 2017), ενώ το υπόλοιπο μέρος αποβάλλεται διαμέσου των βραγχίων ως αμμωνία (ως μεταβολικό προϊόν) ή της ουρίας και των κοπράνων (Ru et al. 2017). Το άζωτο που αποβάλλεται μέσω των βραγχίων μετατρέπεται κυρίως σε αμμωνία NH_3 (Wongkiew et al. 2017, Yildiz et al. 2017), ενώ από την ουρία και τα κόπρανα μετατρέπονται σε οργανικό άζωτο (Wongkiew et al. 2017) το οποίο μετατρέπεται σε αμμωνία από την πρωτεάση και την απαμινάση (Sugita et al. 2005).

Γενικά τα ψάρια εκκρίνουν άζωτο στην μορφή TAN, όπως για παράδειγμα NH_3 and NH_4^+ . Η αναλογία μεταξύ NH_3 και NH_4^+ εξαρτάται κυρίως από το pH και τη θερμοκρασία. Η αμμωνία είναι το κυριότερο απόβλητο του μεταβολισμού των ψαριών λόγω των πρωτεϊνών (Yildiz et al. 2017).

Η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα σε 2 στάδια όπου η αμμωνία NH_3 ή το αμμώνιο NH_4^+ αποβάλλεται από το ψάρι και μετατρέπεται πρώτα σε νιτρώδη NO_2^- και σε νιτρικά NO_3^- ιόντα και συγκεκριμένα από αερόβια χημειοσυνθετικά αυτότροφα βακτήρια. Μια μεγάλη ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου απαιτείται για την βιοχημική διεργασία της νιτροποίησης χρησιμοποιώντας οξυγόνο (Carsiotis & Khanna 1989, Madigan & Martinko 2007, Shoda 2014). Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την οξείδωση της αμμωνίας από αμμωνιο-οξειδωτικά βακτήρια όπως για παράδειγμα τα *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* και *Nitrosovibrio*. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την οξείδωση των νιτρωδών ιόντων σε νιτρικά ιόντα από αζωτοδεσμευτικά βακτήρια όπως για παράδειγμα *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrosospira* και *Nitrospina* (Rurangwa & Verdegem 2013, Timmons & Ebeling 2013, Wongkiew et al. 2017).

Το βακτήριο *Nitrospira sp.* θεωρείται επί του παρόντος ότι είναι ένα πλήρες νιτροποιητικό βακτήριο, συμμετέχοντας στην παραγωγή τόσο των νιτροδών όσο και των νιτρικών ιόντων (Daims et al. 2015). Τα ίδια βακτήρια μπορούν να βρεθούν και σε υδατοκαλλιέργειες και σε ενυδρειοπονικά συστήματα (Wongkiew et al. 2017). Αυτά τα βακτήρια απαντώνται στα βιοφίλτρα καθώς και σε άλλα σημεία του συστήματος (νερό) (Timmons & Ebeling 2013).

Η νιτροποίηση είναι πολύ σημαντική στην υδροπονία μιας και η αμμωνία και τα νιτρώδη ιόντα είναι αρκετά τοξικά για τα ψάρια σε συγκεντρώσεις 0.02–0.07 mg/L αμμωνία-αζώτου είναι αρκετά για να προκαλέσουν ζημιά στα ψάρια που ζουν σε θερμά νερά και τα νιτρώδη ιόντα θα πρέπει να είναι χαμηλότερα από 1 mg/L (Losordo et al. 1998, Timmons & Ebeling 2013). Η αμμωνία επηρεάζει το κεντρικό νευρικό σύστημα του ψαριού (Randall & Tsui 2002, Timmons & Ebeling 2013) ενώ τα νιτρώδη ιόντα προκαλούν προβλήματα με μείωσης του οξυγόνου στο αίμα τους (Losordo et al. 1998). Τα νιτρικά ιόντα μπορούν να αντέξουν τα ψάρια μέχρι και 150-300 mg/L (Goddek et al. 2015, Graber & Junge 2009, Yildiz et al. 2017).

Η νιτροποίηση κυρίως λαμβάνει χώρα στα βιοφίλτρα (Losordo et al. 1998, Timmons & Ebeling 2013). Συνεπώς η έναρξη λειτουργίας ενός συστήματος συνίσταται να γίνεται χωρίς προσθήκη ψαριών ώστε να ωριμάσει σταδιακά ο πληθυσμός των νιτροποιητικών βακτηρίων (Timmons & Ebeling 2013, Wongkiew et al. 2017). Είναι επίσης απαραίτητο να αποφεύγεται η παρουσία οργανικού υλικού στα βιοφίλτρα με σκοπό να αποφεύγεται η ανάπτυξη ανταγωνιστικών ετεροτροφικών βακτηρίων (Timmons & Ebeling 2013).

Διαφορετικά συνίσταται η προσθήκη στο σύστημα εμπορικών σκευασμάτων νιτροποιητικών βακτηρίων ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία ρύθμισης του συστήματος (Kuhn et al. 2010). Παρ' όλα αυτά μικρά ενυδρειοπονικά συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την παρουσία βιοφίλτρου. Σε αυτά τα συστήματα τα νιτροποιητικά βακτήρια αναπτύσσονται στις διαθέσιμες επιφάνειες του συστήματος (πχ. τοιχώματα συστήματος, υλικά πλήρωσης όταν εφαρμόζεται η τεχνική του υποστρώματος) (Somerville et al. 2014).

4. Ισορροπία Μάζας: Εισροή θρεπτικών συστατικών και Πορεία απορρόφησης τους στο σύστημα Ενυδραιοπονίας

4.1 Γενικό πλαίσιο λειτουργίας

Η λειτουργία των Ενυδραιοπονικών συστημάτων βασίζεται στην ισορροπία του κύκλου των θρεπτικών συστατικών (Somerville et al. 2014). Επομένως είναι απαραίτητο να κατανοηθεί η ροή των θρεπτικών στο σύστημα προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα ικανοποιητικά. Τα φυτά που αυξάνονται στις υδροπονικές δεξαμενές έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να καλύπτονται κατά την διάρκεια των διάφορων σταδίων ανάπτυξης (Resh 2013). Επομένως οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στα διάφορα τμήματα του συστήματος πρέπει να παρακολουθούνται καθημερινά και τα θρεπτικάσυστατικά θα πρέπει να συμπληρώνονται προκειμένου περιορίζονται οι ελλείψεις τους (Resh 2013, Seawright et al. 1998) και να προστίθενται είτε στο νερό του συστήματος είτε δια-φυλλικά (Roosta & Hamidpour 2011).

Σύμφωνα με τους Delaide et al. (2016), σε κάποιες περιπτώσεις σε ένα ενυδραιοπονικό διάλυμα προστίθενται θρεπτικά μέταλλα προκειμένου οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών να είναι κατάλληλες (όπως παρατηρείται στην υδροπονία θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις απ' ότι έχουν πετύχει στην υδροπονία). Το πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί ισορροπία στο σύστημα αποτελεί ο σωστός σχεδιασμός και το μέγεθος των δεξαμενών (Buzby & Lin 2014). Αν οι υδροπονικές δεξαμενές είναι πολύ μικρές σε σχέση με την δεξαμενή των ψαριών υπάρχει περίπτωση τα θρεπτικά να συσσωρεύονται στο νερό και οι συγκεντρώσεις τους να φτάσουν σε τοξικά επίπεδα.

Η αναλογία του ρυθμού τροφής χρησιμοποιείται συνήθως ως πρώτος παράγοντας για να υπολογισθεί το μέγεθος του συστήματος (Rakocy et al. 2006, Somerville et al. 2014). Όμως σύμφωνα με τους Seawright et al. (1998) δεν είναι πιθανόν να δημιουργηθεί μια ικανοποιητική αναλογία φυτού/ψαριού η οποία θα είναι η βέλτιστη για τα φυτά έχοντας ως παράγοντα μόνο την τροφή που θα χορηγηθεί για τα ψάρια. Ο έλεγχος ότι το σύστημα είναι καλά ισορροπημένο και λειτουργεί σωστά, οι μέθοδοι παρακολούθησης στηρίζονται στον κύκλο του αζώτου (Cerozi & Fitzsimmons 2017, Somerville et al. 2014) αλλά για την επίτευξη της βέλτιστης

ισορροπίας του συστήματος είναι απαραίτητος ο ημερήσιος έλεγχος της αναλογίας των μακροθρεπτικών (N, P, K, Ca, Mg, S) και των μικροθρεπτικών (Fe, Zn, B, Mn, Mo, Cu) (Resh 2013, Somerville et al. 2014, Sonneveld & Voogt 2009).

Οι Schmautz et al. (2015, 2016) στην έρευνά τους συνέκριναν την απόδοση τριών διαφορετικών ενυδρειοπονικών συστημάτων του NFT (φιλμ θρεπτικών), της επιπέδου σχεδίασης και της στάγδην άρδευσης και συνέκριναν την πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών σε τομάτες.

Το σύστημα που στηρίζονταν στην στάγδην άρδευση ήταν αυτό που απέδωσε ελαφρώς καλύτερο ρυθμό ανάπτυξης στις τομάτες. Τα μεταλλικά θρεπτικά που περιέχουν τα φρούτα (P, K, Ca, Mg) ήταν παρόμοια με τη συμβατική καλλιέργεια της τομάτας παρόλο που η περιεκτικότητα σε σίδηρο και ψευδάργυρο ήταν μεγαλύτερη. Τα φύλλα όμως περιείχαν μικρότερα επίπεδα P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu και Zn από την συμβατική καλλιέργεια.

Οι Delaide et al. (2016) αναφέρουν ότι ο κύκλος των μακρο και μικρο θρεπτικών συστατικών στα ενυδρειοπονικά συστήματα εξαρτάται από τη μέθοδο καλλιέργειας και ότι το K, P, Fe, Cu, Zn, Mn and Mo απουσιάζουν από το νερό, σε αντίθεση με τα N, Ca, B και Na τα οποία συσσωρεύονται γρήγορα.

Οι Graber & Junge (2009) παρατήρησαν ότι τα ενυδρειοπονικά συστήματα περιείχαν 3 φορές λιγότερο άζωτο και 10 φορές λιγότερο φώσφορο απ' ό,τι στα διαλύματα που χρησιμοποιούνται στην υδροπονία. Το κάλιο (K) ήταν 45 φορές λιγότερο σε σχέση με τα υδροπονικά συστήματα. Παρόλες τις διαφορές που εμφανίστηκαν τα συστήματα παρουσίασαν παρόμοιες αποδόσεις και ως ήταν χειρότερη η ποιότητα του νερού λόγω έλλειψης καλίου (K).

4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τον κύκλο των θρεπτικών

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον κύκλο των θρεπτικών και κατ' επέκταση τον ρυθμό πρόσληψής τους από τα φυτά είναι, η θερμοκρασία στις ρίζες των φυτών, η θερμοκρασία του αέρα, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών, το στάδιο ανάπτυξης και ο ρυθμός ανάπτυξης, (Buzby & Lin 2014). Οι Schmautz et al. (2016) και οι Lennard & Leonard (2006) έδειξαν ότι η υδροπονική μέθοδος καλλιέργειας των φυτών επίσης, επηρεάζει τον ρυθμό απορρόφησης του φυτού και είναι απαραίτητο να ταιριάζει το

σύστημα καλλιέργειας με το είδος των φυτών που καλλιεργούνται. Οι μέθοδοι καλλιέργειας του φυτού NFT and DWC (καλλιέργεια σε βάθος-επιπέδουσα σχέδια) συνίσταται να χρησιμοποιείται σε φυλλώδη λαχανικά ενώ η μέθοδος του υποστρώματος ή η μέθοδος της στάγδην άρδευσης σε υποστρώματα συνίσταται να χρησιμοποιείται σε φρουτώδη λαχανικά (Resh 2013).

4.3. Μακροθρεπτικά συστατικά

4.3.1. Ο κύκλος των μακροθρεπτικών συστατικών

Άνθρακας (C)

Ο άνθρακας παρέχεται στο ψάρι διαμέσου της τροφής (Timmons & Ebeling 2013) και στα φυτά μέσω CO₂ σύμφωνα με την οποία ο ανόργανος άνθρακας μετατρέπεται σε οργανικές ενώσεις από τους ζωντανούς οργανισμούς. Τα ψάρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν το 22% του άνθρακα που περιέχεται στην τροφή των ψαριών για να αυξήσει την βιομάζα του και τον μεταβολισμό του. Το υπόλοιπο από τον μεταβολισμό άνθρακα είτε μετατρέπεται σε CO₂ (52%) είτε εκκρίνεται σε διαλυμένη μορφή (0.7-3%) και στέρεα μορφή (25%) (Timmons & Ebeling 2013).

Το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά ως δική τους πηγή άνθρακα (Körner et al. 2017). Το μέρος του άνθρακα που δεν καταναλώθηκε αποσυντίθεται στο σύστημα. Οι τύποι υδατάνθρακα που βρέθηκαν στην τροφή του ψαριού (πχ αμυλούχοι ή μη αμυλούχοι πολυσακχαρίτες) μπορούν επίσης να επηρεάσουν την πεπτικότητα της τροφής και την βιοαποικοδομησιμότητα των αποβλήτων σε ένα ενυδρειοπονικό ή υδατοκαλλιέργειας σύστημα (Meriac et al. 2014).

Άζωτο (N)

Το άζωτο απορροφάτε από τα φυτά με τη μορφή νιτρικών ιόντων είτε ως αμμωνιακά (Sonneveld & Voogt 2009, Xu et al. 2012) το οποίο εξαρτάται από την συγκέντρωση καθώς και τη φυσιολογία του φυτού (Fink & Feller 1998 όπως αναφέρετε στους Wongkiew et al. 2017). Οι συσχετίσεις μεταξύ φυτών και

μικροοργανισμών δεν πρέπει να παραλείπονται, καθώς τα φυτά επηρεάζουν την παρουσία των μικροοργανισμών στην υδρόβια και οι μικροοργανισμοί μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ικανότητα πρόσληψης του αζώτου από τα φυτά (Wongkiew et al. 2017). Η απορρόφηση του αζώτου από το φυτό επηρεάζεται από την συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον (Zhang et al. 2008 cited by Wongkiew et al. 2017).

Φώσφορος (P)

Ο φώσφορος είναι ένα από τα βασικά στοιχεία και χρησιμοποιείται από τα φυτά για την ανάπτυξή τους και μπορεί να απορροφηθεί με τη μορφή φωσφορικών ανιόντων (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) (Prabhu et al. 2007, Resh 2013). Σύμφωνα με τους συγγραφείς δεν υπάρχουν πολλά ερευνητικά στοιχεία για την επίδραση του φωσφόρου στην ανάπτυξη και απορρόφηση του από τα φυτά στα συστήματα ενυδρειοπονίας.

Ο φώσφορος εισέρχεται στο σύστημα διαμέσου της τροφής που χορηγείται στα ψάρια (Cerozi & Fitzsimmons 2017, Delaide et al. 2017, Schmautz et al. 2015), και στα μη συμπληρωματικά συστήματα τροφοδοσίας ο φώσφορος να αποτελεί περιοριστικό παράγοντα με αποτέλεσμα να επηρεάζει την ανάπτυξη του φυτού (Graber & Junge 2009, Seawright et al. 1998).

Σύμφωνα με τους Rafiee και Saad (2005) το ψάρι μπορεί να χρησιμοποιήσει έως και το 15% του φωσφόρου που περιέχεται στην τροφή. Σε σύστημα ενυδρειοπονίας ένα μαρούλι οι Cerozi και Fitzsimmons (2017) αναφέρουν ότι το ποσοστό του φωσφόρου που παρέχεται από την τροφή των ψαριών μπορεί να είναι επαρκής ή μη επαρκής για να καλύψει τις απαιτήσεις του φυτού σε φώσφορο ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού. Μέχρι και 100% του φωσφόρου που υπάρχει στο νερό εκτροφής μπορεί να ανακυκλωθεί από τη βιομάζα των φυτών, το οποίο εξαρτάται από το σύστημα καλλιέργειας. Οι Graber και Junge (2009) αναφέρουν ότι η ανακύκλωση αυτή είναι 50% ενώ οι Schmautz et al. (2015) αναφέρουν ότι το 32% του φωσφόρου μπορούσε να ανιχνευθεί στον καρπό και 28% στα φύλλα.

Η διαλυτότητα του φωσφόρου εξαρτάται από το pH. Υψηλότερο pH συνεισφέρει στην καθίζηση του φωσφόρου καθιστώντας το με αυτό τον τρόπο ως μη διαθέσιμο για τα φυτά (Yildiz et al. 2017). Ο φώσφορος μπορεί να καθιζάνει ως

ορυκτό (στρουβίτης) ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Le Corre et al. 2005) ή ως ορυκτό υδροξυαπατίτης (Cerozi & Eck et al. Fitzsimmons 2017, Goddek et al. 2015). Αυτά τα αδιάλυτα σύμπλοκα απομακρύνονται (μέσο της λάσπης που δημιουργείται).

Οι Schneider et al. (2004) αναφέρουν ότι το 30-65% του φωσφόρου που περιέχεται στην τροφή των ψαριών παραμένει ως μη διαθέσιμος για τα φυτά μιας και απαντάται στα στερεά απόβλητα που με την πάροδο του χρόνου γίνονται λάσπη και απομακρύνονται διαμέσου του φίλτρου. Οι Yogen et al. (2016) αναφέρουν ότι η απώλεια μπορεί να είναι έως και 85%. Μια επιλογή για να αποτραπεί η τεράστια απώλεια του P διαμέσου της λάσπης είναι να προστεθεί ένα σύστημα επεξεργασίας στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Κατά την διάρκεια της αερόβια και αναερόβιας διαδικασίας ο P απελευθερώνεται και μπορεί να επανέλθει στο ανακυκλούμενο νερό (Goddek et al. 2016).

Κάλιο (K)

Οι Delaide et al. (2017) αναφέρουν ότι κύρια πηγή του K στο σύστημα ενυδρειοπονίας αποτελεί η τροφή που παρέχεται στα ψάρια. Τα ψάρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν έως και 7% από την συγκέντρωση του K που περιέχεται στην τροφή (Rafiee & Saad 2005). Όμως το κάλιο δεν θεωρείται απαραίτητο για τα ψάρια και ως εκ τούτου απαντάται σε μικρή περιεκτικότητα στην τροφή και σε μικρότερη συγκέντρωση που να απορροφάτε από τα φυτά (Graber & Junge 2009, Seawright et al. 1998, Suhl et al. 2016).

Η προσθήκη Καλίου στο σύστημα γίνεται δια της προσθήκης KOH το οποίο χρησιμοποιείται ως ρυθμιστικό διάλυμα (buffer) για τη μείωση του pH στα ενυδρειοπονικά συστήματα λόγω της νιτροποίησης (Graber & Junge 2009). Σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα με τομάτες το κάλιο συγκεντρώνεται κυρίως στον καρπό (Schmautz et al. 2016).

Μαγνήσιο (Mg), Ασβέστιο (Ca) και θείο (S)

Η κύρια πηγή Mg, Ca και S στο νερό της βρύσης το οποίο διευκολύνει την απορροφήση από τα φυτά είναι άμεσα διαθέσιμο (Delaide et al. 2017). Το ασβέστιο

ωστόσο υπάρχει σε ανεπαρκή επίπεδα στην ενυδραιοπονία (Schmautz et al. 2015, Seawright et al. 1998) και προστίθεται σε μορφή υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Timmons & Ebeling 2013). Σύμφωνα με τους Rafiee και Saad (2005) το ψάρι χρησιμοποιεί περίπου 26,8% από το ασβέστιο και 20,3% του μαγνησίου που παρέχεται από την τροφή. Το θείο είναι συνήθως σε χαμηλά επίπεδα στα ενυδραιοπονικά συστήματα (Graber & Junge 2009, Seawright et al. 1998).

4.4. Μικροθρεπτικά συστατικά

Ο σίδηρος (Fe), το μαγνήσιο (Mn) και ο ψευδάργυρος (Zn) προέρχονται στην ενυδραιοπονία κυρίως από την τροφή του ψαριού ενώ το βόριο (B) και ο χαλκός (Cu) προσλαμβάνονται από το νερό της βρύσης (Delaide et al. 2017). Στην ενυδραιοπονία τα βασικά μικροθρεπτικά είναι παρόντα αλλά σε χαμηλά επίπεδα αλλά είναι ταυτόχρονα και απαραίτητα. Στην ενυδραιοπονία παρατηρείται συχνά έλλειψη σιδήρου (Schmautz et al. 2015, Seawright et al. 1998, Fitzsimmons & Posadas 1997 όπως αναφέρετε στον Licamele 2009) η οποία οφείλεται στη διαθεσιμότητα των ιόντων σιδήρου.

Η έλλειψη αυτή αντιμετωπίζεται με προσθήκη στο σύστημα χηλικής μορφής σιδήρου (πχ οργανικές χηλικής μορφής ενώσεις σιδήρου) που παράγονται από γένη όπως *Bacillus sp*, ή *Pseudomonas sp* (Bartelme et al. 2018) ή με προσθήκη σιδήρου χηλικής μορφής προκειμένου για να αποφεύγεται η καθίζηση.

4.5 Απώλειες Θρεπτικών συστατικών

Μειώνοντας την απώλεια θρεπτικών είναι μια συνεχής πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι επαγγελματίες ενυδραιοπονίας. Η απώλεια θρεπτικών πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα η καθίζηση λάσπης που δημιουργείται 37% από τα κόπρανα και 18% από την ακατανάλωτη τροφή (Neto & Ostrensky 2015), απώλεια νερού, απονιτροποίηση, πτητικότητα της αμμωνίας (μια χημική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του εδάφους όταν από την οθρία μετατρέπεται σε αέρια αμμωνία σε υψηλό pH) και άλλα (Wongkiew et al. 2017).

Για παράδειγμα οι Rafiee & Saad (2005) παρατήρησαν ότι 24% του σιδήρου,

86% του μαγγανίου, 47% του ψευδάργυρου, 22% του χαλκού, 16% του ασβεστίου, 89% του μαγνησίου, 6% του αζώτου, 6% του καλίου και 18% του φώσφορου περιέχονται στη λάσπη (ίζημα). Η λάσπη μπορεί να κρατήσει έως και το 40% των θρεπτικών συστατικών που περιέχονται στην τροφή.

Η απονιτροποίηση μπορεί να οδηγήσει σε μια απώλεια 25%-60% του αζώτου (Hu et al. 2015, Zou et al. 2016). Η απονιτροποίηση συνδέεται με ανοξικές συνθήκες (Madigan & Martinko 2007, van Lier et al. 2008) και μικρά επίπεδα άνθρακα και είναι υπεύθυνες για την αλλαγή των νιτρικών σε νιτρώδη, νιτρικό οξύ (NO), οξειδίο του αζώτου (N₂O) και τελικά σε αέριο άζωτο (N₂) το οποίο ρέει προς τη ατμόσφαιρα.

Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται από ετερότροφα βακτήρια όπως τα *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Proteus* και *Micrococcus* sp. (Gentile et al. 2007, Michaud et al. 2006, Wongkiew et al. 2017). Ορισμένα βακτήρια συμμετάσχουν στη νιτροποίηση και στην διεργασία της απονιτροποίησης αν τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου είναι μικρότερα από 0,3 mg/L (Fitzgerald et al. 2015, Wongkiew et al. 2017).

Η απώλεια του αζώτου επίσης μπορεί να συμβεί διαμέσου της αναερόβιας οξείδωσης της αμμωνίας (ANAMMOX) π.χ, η οξείδωση της αμμωνίας, σε αέριο άζωτο με την παρουσία νιτρωδών ιόντων (Hu et al. 2011).

Μια ακόμα σημαντική απώλεια αζώτου η οποία έπρεπε να ήταν διαθέσιμη για τα φυτά είναι η κατανάλωση αζώτου από τα ετερότροφα βακτήρια που υπάρχουν στα ενυδρειοπονικά συστήματα. Πράγματι το άζωτο χρησιμοποιείται από τα βακτήρια χάνεται από τα νιτροποιητικά βακτήρια και έτσι εμποδίζεται η νιτροποίηση (Blancheton et al. 2013). Τα βακτήρια βρίσκονται κυρίως όταν τα επίπεδα C/N αυξάνονται καθώς είναι περισσότερο ανταγωνιστικά και πιο ικανά να αποικήσουν το μέσο από τα αυτότροφα βακτήρια νιτροποίησης (Blancheton et al. 2013, Wongkiew et al. 2017).

4.6 Η Δυναμική Ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών στην ενυδρειοπονία

4.6.1. Δυναμική συστημάτων ισορροπίας θρεπτικών ουσιών

Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών είναι τα κυριότερα προβλήματα σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα π.χ., η δεξαμενή των ψαριών και το υδροπονικό διάλυμα χρειάζονται να είναι ισορροπημένο για κάθε ανάγκη.

Σε κλειστά ενυδρειοπονικά συστήματα τα θρεπτικά μεταφέρονται από το ψάρι στα φυτά διαμέσου των φίλτρων) για νιτροποίηση. Όμως οι θρεπτικές ανάγκες των καλλιεργειών και τα παρεχόμενα θρεπτικά συστατικά από το υποσύστημα του υδάτινου οργανισμού δεν είναι ισορροπημένα.

Στα συστήματα ενυδρειοπονίας (απλά και σύνθετα) είναι πιο εύκολο να παρέχονται οι κατάλληλες συνθήκες και για το ψάρι και για το τμήμα των φυτών, μέσω της σχεδίασης του συστήματος το βέλτιστο 240 M (Eck et al. 2019). Υπολογίζεται το μέγεθος της υδροπονικής δεξαμενής, η δεξαμενή του ψαριού, τα βιοφίλτρα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο σύστημα ενυδρειοπονίας (Goddek & Körner 2019).

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα συστήματα ενυδρειοπονίας όπου τα θρεπτικά στοιχεία ανακυκλοφορούν στα συστήματα και προέρχονται εξ ολοκλήρου από τα ψάρια (decoupled) αποτελούνται από εξοπλισμό όπως αναερόβια ανοδικής ροής φίλτρα επεξεργασίας της λάσπης (ιζήματος) (Goddek et al. 2018), ή αποτελούνται από μονάδες απομάκρυνσης αλάτων (συστήματα αφαλάτωσης) (Goddek & Keesman 2018), έχοντας ως απώτερο στόχο να επέλθει ισορροπία στο σύστημα.

Οι Goddek & Keesman (2018) περιγράφουν ένα πλήρες σύστημα προσθήκης θρεπτικών συστατικών στο σύστημα, καθώς το απόλυτα ισορροπημένο σύστημα οδηγείται από έναν μη δυναμικό ρυθμό εξάτμισης που λαμβάνει χώρα σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, η εξατμισοδιαπνοή (ETc) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως για παράδειγμα οι κλιματολογικές συνθήκες και οι βιολογικές μεταβλητές. Η εξάτμιση υπολογίζεται ανά έκταση επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από την καλλιέργεια και υπολογίζεται για διαφορετικά επίπεδα στην καλλιέργεια ενσωματώνοντας καθαρές ροές ακτινοβολίας, την αντίσταση οριακού στρώματος, την αντίσταση των στομάτων και το έλλειμμα πίεσης ατμών (Körner et al. 2007) χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Penman– Monteith.

Αυτή η εξίσωση, ωστόσο, υπολογίζει τη ροή του νερού διαμέσου της

καλλιέργειας. Η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών υπολογίζεται απλά υποθέτοντας ότι όλα τα αραιωμένα θρεπτικά συστατικά στο νερό προσλαμβάνονται από την καλλιέργεια. Στην πραγματικότητα όμως, η λήψη των θρεπτικών συστατικών είναι ένα πολύ περίπλοκο θέμα. Διαφορετικά θρεπτικά συστατικά εκδηλώνουν διαφορετικές καταστάσεις, αλλαγή με παραμέτρους όπως το pH.

Η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στα φυτά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH και τις σχέσεις που αναπτύσσονται των θρεπτικών συστατικών μεταξύ τους (π.χ. Διαθεσιμότητα σε K/Ca). Επιπλέον, τα βακτήρια που αναπτύσσονται στις ρίζες των φυτών παίζουν σημαντικό ρόλο (Orozco-Mosque et al. 2018). Συνεπώς το μεγαλύτερο ποσό των θρεπτικών συστατικών δεν μπορεί να εκφραστεί μέσω μοντέλων προκειμένου να επιτευχθεί εξισορρόπηση μεταξύ των θρεπτικών συστατικών.

Ο ευκολότερος τρόπος για την εκτίμηση της πρόσληψης θρεπτικών συστατικών είναι η υπόθεση ότι τα θρεπτικά συστατικά απορροφώνται ως διαλυμένα στο νερό της άρδευσης και εφαρμόζονται στην παραπάνω εξηγημένη προσέγγιση υπολογισμού ETc και υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει χημικό για συγκεκριμένα στοιχεία, υπάρχουν βιολογικές ή φυσικές αντιστάσεις. Κατά συνέπεια, για να διατηρηθεί η ισορροπία, τα θρεπτικά συστατικά που λαμβάνονται από την καλλιέργεια θα πρέπει να περιέχονται στο θρεπτικό διάλυμα που θα προστεθεί στο ενυδρειοπονικό σύστημα.

5. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, ο κύκλος των θρεπτικών συστατικών σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας πρέπει να βελτιωθεί προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ανάπτυξη των φυτών. Για να αποφευχθεί η απώλεια των θρεπτικών συστατικών που συλλέγονται με τη μορφή λάσπης που καθιζάνει, έχουν σχεδιαστεί συστήματα (φίλτρα) επαναοργανοποίησης της λάσπης με σκοπό να μπορούν να εξαχθούν τα θρεπτικά συστατικά στο σύστημα ώστε τα φυτά να μπορούν να απορροφήσουν (Delaide 2017). Μια περαιτέρω τεχνική για τη μείωση της απώλειας θρεπτικών συστατικών αποτελεί η ενίσχυση πρόσληψης των φυτών μέσω της συγκέντρωσης του διαλύματος στο ενυδρειοπονικό σύστημα (δηλαδή η απομάκρυνση ενός κλάσματος νερού από το σύστημα προκειμένου να διατηρηθεί η ίδια ποσότητα θρεπτικών συστατικών αλλά σε μικρότερο όγκο νερού). Μια τέτοια συγκέντρωση θρεπτικών θα μπορούσε να επιτευχθεί με την προσθήκη μιας μονάδας αφαλάτωσης ως τμήμα του ενυδρειοπονικού συστήματος (Goddek & Körner 2019, Goddek & Keesman 2018).

Τέλος, η χρησιμοποίηση τέτοιων συστημάτων ενυδρειοπονίας επιτρέπει τη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών για τη διαβίωση και ανάπτυξη των ψαριών, των φυτών και των μικροοργανισμών. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση της ανακύκλωσης των θρεπτικών συστατικών στην ενυδρειοπονία.

Πράγματι, περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον ακριβή κύκλο κάθε μακροθρεπτικού συστατικού (ποια μορφή, πώς μπορεί να μετασχηματιστεί ή όχι από τους μικροοργανισμούς, πώς απορροφάται από τα φυτά) ή την επίδραση των φυτών και των ψαριών και των παραμέτρων του νερού στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση του ενυδρειοπονικού συστήματος.

Στην υδροπονία, το θρεπτικό διάλυμα προσδιορίζεται με ακρίβεια και η προσθήκη θρεπτικών συστατικών στο σύστημα είναι απόλυτα ελεγχόμενη. Αυτό καθιστά σχετικά εύκολη την προσαρμογή του θρεπτικού διαλύματος για κάθε είδος φυτού και για κάθε στάδιο ανάπτυξης. Στην ενυδρειοπονία, σύμφωνα με τους Palm et al. (2018), τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται τουλάχιστον κατά 50% από τις τροφές που χορηγούνται στα ψάρια και δεν καταναλώνονται, τα στερεά απόβλητα (κόπρανα) και υγρά απόβλητα (αμμωνία, ουρία) που προέρχονται από τα ψάρια καθιστώντας με τον τρόπο αυτό την παρακολούθηση και τον συχνό έλεγχο των συγκεντρώσεων των

θρεπτικών συστατικών που είναι διαθέσιμα ώστε να προσληφθούν από τα φυτά δυσκολότερο.

Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η απώλεια των θρεπτικών ουσιών μέσω πολλών οδών όπως η απομάκρυνση του ιζήματος (λάσπης), η ανανέωση του νερού ή η απονιτροποίηση. Η απομάκρυνση της λάσπης προκαλεί απώλεια θρεπτικών συστατικών καθώς πολλά βασικά θρεπτικά συστατικά όπως ο φωσφόρος καθιζάνουν συχνά και στη συνέχεια παγιδεύονται στην εκκενωμένη στερεή λάσπη. Η ανανέωση του νερού, η οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε μικρές αναλογίες, αυξάνει επίσης την απώλεια θρεπτικών ουσιών από το σύστημα ενυδρειοπονίας. Τέλος, η απονιτροποίηση συμβαίνει λόγω της παρουσίας βακτηρίων απονιτροποίησης εξαιτίας των ευνοϊκών συνθηκών που δημιουργούνται κατάλληλες για το μεταβολισμό τους.

6. Βιβλιογραφία

6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Alessio G., Allegrucci G., Angle G. (2001). *Acquacoltura responsabile – Verso le produzioni acquatiche del terzo millennio* Romma: Unimar-Uniprom.
- Allison EH (2011) Aquaculture, fisheries, poverty and food security. *Security* 61.
- Altinoki., KayisaS., CapkinE., 2006. Pseudomonas putidainfection in rainbow trout. *Aquaculture*. 261:850–855
- Andersson E (2015) Turning waste into value: Using human urine to enrich soils for sustainable food production in Uganda. *J Clean Prod* 96:290-298.
- Ayers R. S. and Wescott D. W. (1989). Water quality for agriculture, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, vol. 29, pp. 737–746.
- Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet OJ, Newton RJ (2018) Strip-ping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Front Microbiol* 9(8). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008>
- Boxman S., Main K., Nystrom M., Ergas S.J., Trotz M. (2015) Aquaponic System Produces Red Drum, Saltwater Vegetable Species, *Global Aquaculture Advocate*, pp. 58-60.
- Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge R, Villarroel M, Kotzen B, Komives T (2016) Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles* 2(1720). <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>
- Blancheton JP, Attramadal KJK, Michaud L, d'Orbcastel ER, Vadstein O (2013) In-sight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. *Aquac Eng* 53:30–39
- Brummett RE, Ponzoni RW (2009) Concepts, alternatives, and environmental considerations in the development and use of improved strains of tilapia in African aquaculture. *Rev Fish Sci* 17:70-77.
- Boyd CE (2015) Overview of aquaculture feeds: global impacts of ingredient use. *Feed Feed Pract Aquac* 3–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00001-5>
- Bugbee B (2004) Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hortic* 648:99–112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12>

- Buzby KM, Lin LS (2014) Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquac Eng* 63:39-44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002>
- Carsiotis M, Khanna S (1989) Genetic engineering of microbial nitrification. United States Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati
- Cerozi BS, Fitzsimmons K (2017) Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agric Syst* 153:94–100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>
- Daims H, Lebedeva EV, Pjevac P, Han P, Herbold C, Albertsen M, Jehmlich N, Palatinszky M, Vierheilig J, Bulaev A, Kirkegaard RH, Von Bergen M, Rattei T, Bendinger B, Nielsen H, Wagner M (2015) Complete nitrification by Nitrospira bacteria. *Nature* 528:504. <https://doi.org/10.1038/nature16461>
- Davidson J, Good C, Barrows FT, Welsh C, Kenney PB, Summerfelt ST (2013) Comparing the effects of feeding a grain- or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* 52:45–57. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.08.001>
- Delaide B (2017) A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability. PhD thesis. Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege
- Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Haissam Jijakli M, Lalman J, Junge R (2016) Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water* 8. <https://doi.org/10.3390/w8100467>
- Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. *Aquac Eng* 78:130–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>
- Drangert JO (1998) Fighting the urine blindness to provide more sanitation options. *Water SA* 24:157-164
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.B., Hassan A. (2009). *A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system*. *Bioresource Technology* 101 (2010) 1511-1517.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system, *Desalination and Water Treatment*, vol. 32, pp. 422-430.

- Faber M, Witten C, Drimie S (2011) Community-based agricultural interventions in the context of food and nutrition security in South Africa. *South African J Clin Nutr* 24:21-30.
- FAO (2014) Small-scale aquaponic food production. FAO fisheries and aquaculture technical paper, Rome, Italy.
- FAO (2015) Land and property rights: Junior Farmer Field and Life School, Facilitator's guide. Aquaculture, Rome, Italy.
- Fitzgerald CM, Camejo P, Oshlag JZ, Noguera DR (2015) Ammonia-oxidizing microbial communities in reactors with efficient nitrification at low-dissolved oxygen. *Water Res* 70:38–51. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2014.11.041>
- Fronte B., Galliano G., Bibbiani C. (2016). *From freshwater to marine aquaponic: new opportunities for marine fish species production*. 4th Conference with International Participation Conference VIVUS-on Agriculture, Environmentalism, Horticulture and Floristics, Food Production and Processing and Nutrition «With Knowledge and Experience to New Entrepreneurial Opportunities» 20th and 21st April 2016, Biotechnical Centre Naklo, Strahinj 99, Naklo. Slovenia.
- Geay F, Ferrarresso S, Zambonino-Infante JL, Bargelloni L, Quentel C, Vandeputte M, Kaushik S, Cahu CL, Mazurais D (2011) Effects of the total replacement of fish-based diet with plant-based diet on the hepatic transcriptome of two European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) half-sibfamilies showing different growth rates with the plant-based diet. *BMC Genomics* 12:522. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-522>
- Gentile ME, Lynn Nyman J, Criddle CS (2007) Correlation of patterns of denitrification instability in replicated bioreactor communities with shifts in the relative abundance and the denitrification patterns of specific populations. *ISME J* 1:714–728. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.87>
- Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, et al. (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustain* 7:4199-4224.
- Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. *Desalination* 428:76–85. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.11.024>
- Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. *Agric Syst* 171:143

- Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7:4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek S, Schmutz Z, Scott B, Delaide B, Keesman K, Wuertz S, Junge R (2016) The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. *Agronomy* 6:37. <https://doi.org/10.3390/agronomy6020037>
- Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP et al (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. *Aquac Eng* 83:10–199 *Nutrient Cycling in Aquaponics Systems* 243
- Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246:147–156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Guangzhi G (2001) Mass balance and water quality in aquaculture tanks. The United Nations University, Fisheries Training Programme, Reyjavik
- Hu B, Shen L, Xu X, Zheng P (2011) Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. *Biochem Soc Trans* 39:1811–1816. <https://doi.org/10.1042/BST20110711>
- Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC, Khanal SK (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresources* 188:92–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>
- Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC, et al. (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresour Technol* 188:92-98. Hua K, Bureau DP (2012) Exploring the possibility of quantifying the effects of plant protein ingredients in fish feeds using meta-analysis and nutritional model simulation-based approaches. *Aquaculture* 356–357:284–301. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2012.05.003>
- Ibironke OA (2013) Glasshouse production of vegetables and ornamentals for agricultural productivity in Nigeria. *World J Agric Sci* 1:113-119.
- Johnson C, Albrecht G, Ketterings Q (2005) Nitrogen basics-The nitrogen cycle. Cornell University Coop Extension p. 1-2.
- Jorquera M, Martínez O, Maruyama F, Marschner P, de la Luz Mora M (2008) Current and future biotechnological applications of bacterial Phytases and phytase-producing Bacteria. *Microbes Environ* 23:182–191. <https://doi.org/10.1264/jsme2.23.182>

- Körner O, Aaslyng JM, Andreassen AU, Holst N (2007) Modelling microclimate for dynamic greenhouse climate control. *Hortscience* 42:272–279
- Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. *Acta Hort* 1170:309–316
- Khater ESG, Bahnasawy AH, Shams AEHS, Hassaan MS, Hassan YA (2015) Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation. *Ecol Eng* 83:199–207.
- Kratky BA (2009) Three non-circulating hydroponic methods for growing lettuce. *Acta Hort* 843:65–72.
- Kuhn DD, Drahos DD, Marsh L, Flick GJ (2010) Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* 43:78–82. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2010.07.001>
- Lam SS, Ma NL, Jusoh A, Ambak MA (2015) Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic rearing tank components. *Int Biodeterior Biodegrad* 102:107–115.
- Le Corre KS, Valsami-Jones E, Hobbs P, Parsons SA (2005) Impact of calcium on struvite crystals size, shape and purity. *J Cryst Growth* 283:514–522. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2005.06.012>
- Lennard W (2004) Aquaponics research at Melbourne, Australia. *Aquaponics J* 18–24.
- Le Corre KS, Valsami-Jones E, Hobbs P, Parsons SA (2005) Impact of calcium on struvite crystals size, shape and purity. *J Cryst Growth* 283:514–522. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2005.06.012>
- Letelier-Gordo CO, Dalsgaard J, Suhr KI, Ekmann KS, Pedersen PB (2015) Reducing the dietary protein:energy (P:E) ratio changes solubilization and fermentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) faeces. *Aquac Eng* 66:22–29
- Liang JY, Chien YH (2013) Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. *Int Biodeterior Biodegrad* 85:693–700.
- Licamele J (2009) Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. PhD thesis. Department of Agriculture and biosystems engineering, University of Arizona
- Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, et al. (2015) Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435:67–74.

- Losordo TM, Masser MP, Rakocy J (1998) Recirculating aquaculture tank production systems: an overview of critical considerations. SRAC No. 451, pp 18–31
- Lund J (2014) Aquaculture effluents as fertilizer in hydroponic cultivation. Swedish Uni 1-19.
- Main K.L. (2015). Sustainable approaches to growing local seafood for local communities, World Aquaculture, Jeju, South Korea.
- Madigan MT, Martinko JM (2007) Biologie des micro-organismes, 11th edn. Pearson Education France, Paris
- Meriac A, Eding EH, Schrama J, Kamstra A, Verreth JAJ (2014) Dietary carbohydrate composition can change waste production and biofilter load in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* 420–421:254–261. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.018>
- Michaud L, Blancheton JP, Bruni V, Piedrahita R (2006) Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquac Eng* 34:224–233. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.005>
- Morshuizen TL (2013) The commercial viability of aquaponics. *J Chem Inf Model* 53:1689-1699.
- Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, et al. (2015) Perspective for aquaponic systems: “omic” technologies for microbial community analysis. *Biomed Res Int* 2015:1-10.
- Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, Ocampo-Velazquez RV, Garcia-Trejo JF, Guevara-Gonzalez RG (2015) Perspective for aquaponic systems: “omic” technologies for microbial community analysis. *Biomed Res Int* 2015:1. <https://doi.org/10.1155/2015/480386>
- Murugan AV, Swarnam TP (2013) Nitrogen release pattern from organic manures applied to an acid soil. *J Agric Sci* 5:174.
- Neto MR, Ostrensky A (2015) Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions. *Aquac Res* 46:1309–1322. <https://doi.org/10.1111/are.12280>
- 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.

- Nyamangara J, Mtambanengwe F, Musvoto C (2009) Carbon and nitrogen mineralization from selected organic resources available to smallholder farmers for soil fertility improvement in Zimbabwe. *African J Agric Res* 4:870-877.
- Ochsenbein G, Wachter D (2004) Sustainability assessment: Conceptual framework and basic methodology. *Fed Off Spat Dev* p.1-62.
- Orozco-Mosque MC, Rocha-Granados MC, Glick BR, Santoyo G (2018) Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-promoting mechanism. *Microbiol Res*. In Press 244 M. Eck et al.
- Palm W.H., Bissa K., Knaus U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part II: fish and plant growth, *AAFL Bioflux*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 162-175.
- Palm HW, Seidemann R, Wehofsky S, Knaus U (2014) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: System design, chemo-physical parameters and general aspects. *AAFL Bioflux* 7:20-32.
- Pantanella E., Colla G. (2013). Saline aquaponics opportunities for integrated marine aquaculture. International aquaponic conference: Aquaponics and global food security, 19-21, June 2013. University of Wisconsin-Stevens Point, 2013.
- Pantanella E., Bhujel C.R. (2015). Saline Aquaponics-Potential Player In Food, Energy Production. *Global Aquaculture Advocate*, pp. 42-43.
- Pantanella E. (2012b). Integrated Marine Aquaculture-Agriculture: Sea Farming Out of The Sea, *Global Aquaculture Advocate*, pp. 70-72.
- Prabhu AS, Fageria NK, Berni RF, Rodrigues FA (2007) Phosphorus and plant disease. In: Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (eds) Mineral nutrition and plant disease. The American Phyto-pathological Society, St. Paul, pp 45-55
- Rakocy J (2007) Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J* 3rd Quarter 2:14-17.
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- Integrating fish and plant culture. SRAC Publications, Canada.
- Rafiee G, Saad CR (2005) Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244:109-118.
- Rafiee G, Saad CR (2005) Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture

- Rakocy JE, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2004) Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Hort* 648:63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8>
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. *SRAC Publ South Reg Aquac Cent* 16. <https://doi.org/454>
- Randall D, Tsui TK (2002) Ammonia toxicity in fish. *Mar Pollut Bull* 45:17–23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)
- Resh HM (2013) *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced homegardener and the commercial hydroponic grower*, 7th edn. CRC Press, Boca Raton
- Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci Hort* (Amsterdam) 129:396-402.
- Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrientson tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci Hort* 129:396–402. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2011.04.006>
- Roosta HR, Hamidpour M (2013) Mineral nutrient content of tomato plants in Aquaponic andhydroponic systems: effect of foliar application of some macro- and micro-nutrients. *J Plant Nutr* 36:2070–2083. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.821707>
- Roosta HR. (2014) Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic:Aquaponic Solutions. *J Plant Nutr* 37:1782-1803.
- Ru D, Liu J, Hu Z, Zou Y, Jiang L, Cheng X, Lv Z (2017) Improvement of aquaponic performancethrough micro- and macro-nutrient addition. *Environ Sci Pollut Res* 24:16328–16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>
- Rurangwa E, Verdegem MCJ (2013) Microorganisms in recirculating aquaculture systems and theirmanagement. *Rev Aquac* 7:117–130. <https://doi.org/10.1111/raq.12057>
- Sace CF, Fitzsimmons KM (2013) Vegetable production in a recirculating aquaponic system using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Acad J Agric Res* 1:236-250.

- Schmautz Z, Graber A, Mathis A, Griessler Bulc T, Junge R (2015) Tomato production in aquaponic system: mass balance and nutrient recycling (abstract)
- Schmautz Z, Loeu F, Liebisch F, Graber A, Mathis A, Bulc TG, Junge R (2016) Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water* 8:1–22. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits THM (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. *Arch Microbiol* 199:613. <https://doi.org/10.1007/s00203-016-1334-1>
- Schneider O, Sereti V, Eding EH, Verreth JAJ (2004) Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquac Eng* 32:379–401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001>
- Seawright DE, Stickney RR, Walker RB (1998) Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems. *Aquaculture* 160:215–237
- Schouw NL, Tjell JC (2003) Social and institutional feasibility of recycling nutrients in waste in Southern Thailand. *Waste Manag Res* 21:393–404.
- Bonvin C (2013) Recycling of phosphorus and nitrogen from human urine: Evaluation of two urine based fertilizers. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Shoda M (2014) Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis*. *JBiosci Bioeng* 117:737–741. <https://doi.org/10.5772/68052>
- 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
- Somerville C, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome
- Sonneveld C, Voogt W (2009) Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht/Heidelberg/London/New York
- Sugita H, Nakamura H, Shimada T (2005) Microbial communities associated with filter materials in recirculating aquaculture systems of freshwater fish. *Aquaculture* 243:403. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.0289>
- Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Scheibe G, Schmidt U (2016) Advanced aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agric Water Manag* 178:335–344. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>

- Tacon AGJ, Metian M (2008) Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. *Aquaculture* 285:146–158. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015>
- Timmons MB, Ebeling JM (2013) *Recirculating aquaculture*. Ithaca Publishing, New York
- Turcios AE, Papenbrock J (2014) Sustainable treatment of aquaculture effluents—what can we learn from the past for the future? *Sustainability* 6:836–856. <https://doi.org/10.3390/su6020836>
- USAID (2013) *Sustainable fisheries and responsible aquaculture: A Guide for USAID Staff and Partners*. University of Rhode Island/Coastal Resources Centre, Rhode Island, USA
- van Lier JB, Mahmoud N, Zeeman G (2008) In: Henze M, van Loosdrecht MCM, Ekama GA, Brdjanovic D (eds) *Anaerobic wastewater treatment, in: biological wastewater treatment: principles, modelling and design*. IWA Publishing, London. ISBN: 9781843391883
- van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* 53:49–56. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.010>
- 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.
- Waller U., Buhmann A.K., Emst A., Hanke W., Kulakowski A., Wecker B., Orellana I. (2015). Papenbrock, J. Integrated multi-tropic aquaculture in a zero – exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. *Aquac. Int.* 2015, 23, 1473-1489.
- Wongkiew., S., Hu., Z., Chandran., K., Lee., W.J., Khanal., K., S. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19.
- Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, Lee JW, Khanal SK (2017) Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquac Eng* 76:9–19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Xu G, Fan X, Miller AJ (2012) Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annu Rev Plant Biol* 63:153–182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>

- Yildiz HY, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and Faeces-a review. *Water* 9. <https://doi.org/10.3390/w9010013>
- Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of three loops off-grid, aquaponics. *Water* 8. <https://doi.org/10.3390/w8120589>
- Zekki H, Gauthier L, Gosselin A (1996) Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *JAm Soc Hortic Sci* 121:1082–1088
- Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Guimbaud C, Fang Y (2016) Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresour Technol* 210:81–87. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.12.079>

6.2 Διαδικτυακή βιβλιογραφία

[https:// www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/)

<https://blog.farmacon.gr>