



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΛΙΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

(πρώην Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας –Υδατοκαλλιέργειών)

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΙΧΘΥΟΤΡΟΦΙΚΗ  
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ”**

**“THE SYNERGY BETWEEN AQUACULTURE AND HYDROPONIC  
TECHNOLOGIES”**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :

ΤΣΙΑΜΗΣ ΠΑΥΛΟΣ

ΚΟΥΡΟΥΚΛΗ ΟΛΓΑ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ :

ΠΑΝΑΓΑΓΓΕΛΟΣ ΔΕΝΔΡΙΝΟΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξάνεται με δραματικό ρυθμό, έχοντας σήμερα φθάσει τα 7,34 δισεκατομμύρια και αναμένεται να φθάσει τα 10 δισεκατομμύρια έως το 2060. Το ολοένα και αυξανόμενο βιοτικό επίπεδο όλο και μεγαλύτερης μερίδας του πληθυσμού έχει φέρει την αύξηση της κατανάλωσης ζωικών πρωτεϊνών και κυρίως ψαριών. Στις ανεπτυγμένες χώρες η κατανάλωση ψαριών έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με την κατά κεφαλήν κατανάλωση να αυξάνεται από 17,4 κιλά το 1961 σε 24,4 κιλά το 2017, με πάνω από 3 δισεκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως να λαμβάνουν σήμερα περίπου το 17% – 20% της ζωικής τους πρωτεΐνης (6,5% της συνολικής κατανάλωσης πρωτεΐνης) από ψάρια. Καθώς ο ανθρώπινος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται και η βιομηχανία αλίευσης μειώνεται, η εξάρτηση από τα εκτρεφόμενα ψάρια ως βασική πηγή πρωτεΐνης θα αυξηθεί επίσης. Η υδατοκαλλιέργεια έχει θετικές επιπτώσεις όπως: μείωση πίεσης στα άγρια αποθέματα, ανοικοδόμηση των εξαντλημένων άγριων αποθεμάτων, επεξεργασία λυμάτων, παροχή προσιτής πρωτεΐνης και εισοδήματος με βάση τα ψάρια. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρνητικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά, οικονομικά και προβλήματα που προκύπτουν από τις υδατοκαλλιέργειες όπως, τα περιβαλλοντικά επιβλαβή επίπεδα απόρριψης λυμάτων, η αυξημένη κατανάλωση νερού, οι διαφυγές ψαριών εκτροφής, η μετάδοση παρασίτων και ασθενειών, η παρουσία ρύπων κ.α.

Σε αυτά τα προβλήματα η ενυδραιοπονία, συνδυάζοντας την παραγωγή υδρόβιων ζώων και φυτών, μπορεί να προσφέρει λύσεις στην παραγωγή τροφίμων, περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα ενυδραιοπονικά συστήματα, πως ορίζονται, από ποια μέρη αποτελούνται, ποιες είναι οι αρχές λειτουργίας τους και τι οφέλη και μειονεκτήματα παρουσιάζουν. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας που έγινε πάνω στην ενυδραιοπονία αλμυρού νερού που συνδυάζει την εκτροφή θαλάσσιων ζώων με την ταυτόχρονη καλλιέργεια φυτικών οργανισμών.

## **ABSTRACT**

The human population is growing at a dramatic rate, having now reached 7.34 billion and is expected to reach 10 billion by 2060. The growing standard of living of a continuously soaring portion of the population, has led to an increase in the consumption of animal protein and mainly fish protein. In developed countries, fish consumption has increased significantly in recent decades, with per capita consumption rising from 17.4 kg in 1961 to 24.4 kg in 2017, with over 3 billion people worldwide currently receiving about 17% - 20% of their animal protein (6.5% of total protein consumption) from fish. As the human population continues to grow and the fishing industry shrinks, dependence on farmed fish from aquaculture systems as a major source of protein will also increase. Aquaculture has positive effects such as: reducing pressure on wild stocks, rebuilding depleted wild stocks, wastewater treatment, providing affordable protein and fish-based income. However, there are also negative environmental, social, economic and impacts arising from aquaculture such as environmentally harmful levels of wastewater discharge, increased water consumption, leakage of farmed fish, transmission of pests and diseases, the presence of pollutants, etc.

In these problems, aquaculture, combining the production of aquatic animals and plants, can offer, environmental, economic and social solutions coupled food production. In the present study, the aquaponic systems are presented. In more details it is presented, how they are defined, what parts they consist of, what are their principles of operation and what advantages and disadvantages they present. Finally, the results of the bibliographic research carried out on the saltwater aquaponics that combines the breeding of marine animals with the simultaneous cultivation of plant organisms are presented.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	5
1. Εισαγωγή .....	8
1.1 Συστήματα Υδατοκαλλιέργειας με Ανακυκλοφορία νερού.....	11
1.2 Υδροπονία .....	12
1.3 Ενυδρειοπονία (aquaponics) .....	13
2. Συστήματα Υδατοκαλλιέργειας με Ανακυκλοφορία (RAS).....	15
2.1 Εισαγωγή .....	15
2.2 Σύσταση ενός συστήματος RAS .....	16
2.2.1 Δεξαμενή ψαριών (fish tank).....	17
2.2.2 Μηχανικό φίλτρο.....	18
2.2.3 Βιολογικό Φίλτρο .....	20
2.3 Έλεγχος ποιότητας νερού μέσω RAS .....	21
2.3.1 Διαλυτό οξυγόνο .....	21
2.3.2 Αμμωνία .....	23
2.3.3 Βιοστερεά.....	24
2.3.4 Διοξείδιο του άνθρακα CO <sub>2</sub> .....	25
2.3.5 Συνολική πίεση αερίων.....	27
2.3.6 Νιτρικά.....	28
2.3.7 Αλκαλικότητα.....	28
3. Ενυδρειοπονία .....	30
3.1 Εισαγωγή .....	30

3.2 Ορισμός ενυδρειοπονίας .....	33
3.3 Αρχές της ενυδρειοπονίας.....	37
3.4 Το νερό και η σημασία του.....	40
4. Ενυδρειοπονικά συστήματα .....	43
4.1 Συζευγμένα ενυδρειοπονικά συστήματα .....	43
4.1.1 Περιγραφή συζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος .....	45
4.1.2 Δεξαμενές ενυδρειοπονικής μονάδας.....	47
4.1.3 Φιλτράρισμα.....	48
4.1.4 Υδροπονία στα συζευγμένα συστήματα ενυδρειοπονίας .....	50
4.2 Αποσυνδεδεμένα ενυδρειοπονικά συστήματα .....	52
4.2.1 Περιγραφή αποσυνδεδεμένου ενυδρειοπονικού συστήματος.....	53
4.2.2 Βρόγχος ανοργανοποίησης.....	57
4.2.3 Βρόγχος εκχύλιση/αφαλάτωσης.....	59
5. Ενυδρειοπονία αλμυρού νερού .....	61
5.1 Συνδυασμένη με αλόφυτα.....	61
5.2 Συνδυασμένη με γλυκόφυτα.....	70
5.3 Συνδυασμένη με φύκια .....	72
6. Συμπεράσματα.....	79
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>81</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Εξέλιξη παγκόσμιου πληθυσμού από το 1930 μέχρι το 2060.....	8
Εικόνα 1.2: Μέση κατανάλωση ψαριών ανά κάτοικο, την περίοδο 2015-2017. .....	9
Εικόνα 2.1: Βασικά μέρη ενός συστήματος RAS. ....	17
Εικόνα 2.2: Τυμπανοειδές φίλτρο.....	19
Εικόνα 2.3: Εσωτερικό τυμπανοειδούς φίλτρου .....	19
Εικόνα 2.4: Biotower με τα φίλτρα στο εσωτερικό. ....	20
Εικόνα 2.5: Πλάκα διάχυσης οξυγόνου .....	22
Εικόνα 2.6: Α) Εγχυτήρες Venturi, Β) Κόνος Spreece. ....	23
Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση αεριστή τύπου καταρράκτη.....	26
Εικόνα 2.8: Σχηματική απεικόνιση αεριστή με στήλη. ....	27
Εικόνα 3.1: Α) Γραφική απεικόνιση των Chinampas των Αζτέκων Β) Σημερινή αξιοποίησή τους. ....	32
Εικόνα 3.2: Σημερινή συγκαλλιέργεια ψαριών και φυτών σε ορυζώνες της Ινδίας. ....	32
Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ροής θρεπτικών σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας.....	34
Εικόνα 3.4: Κύκλος μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων σε ενυδρειοπονικό σύστημα κλειστού βρόγχου .....	38
Εικόνα 4.1: <i>Ictalurus punctatus</i> .....	43

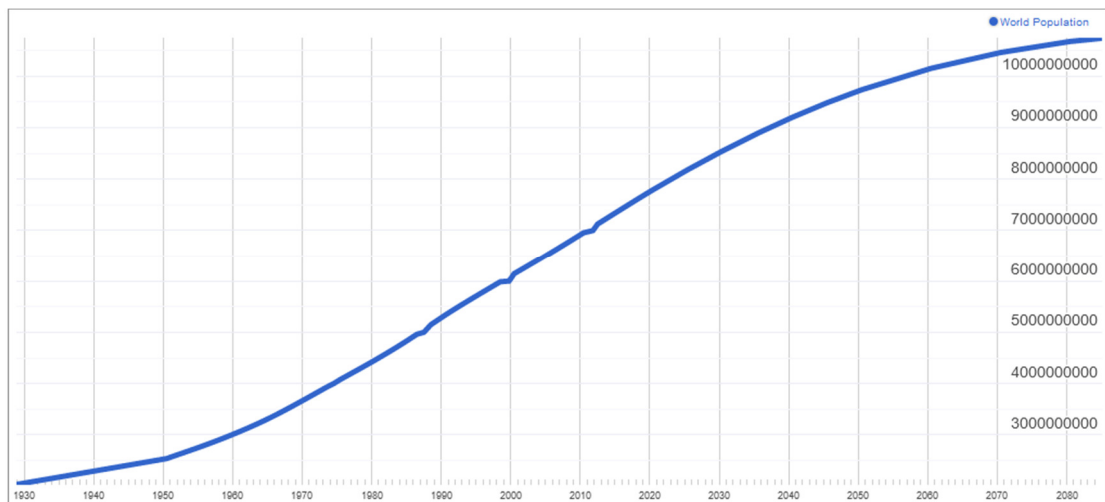
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα του πρώτου κλειστού συστήματος ανακυκλοφορίας του Naegel για την εκτροφή τιλάπιας ( <i>Tilapia mossambica</i> ) και κυπρίνου ( <i>Cyprinus carpio</i> ) σε συνδιασμό με υδροπονική καλλιέργεια ντομάτας και μαρουλιού.....	44
Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση συζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος .....	45
Εικόνα 4.4: Τα στοιχεία μιας ενυδρειοπονικής μονάδας.....	47
Εικόνα 4.5: Αρχή λειτουργίας φίλτρου με ιζηματοποιητή και φίλτρο δίσκου .....	50
Εικόνα 4.6: Υδροπονικό σύστημα Deep Water Culture, DWC.....	51
Εικόνα 4.7: Τεχνική μεμβράνης θρεπτικών συστατικών (Nutrient Film Technique, NFT). .....	52
Εικόνα 4.8: Ενυδρειοπονικό σύστημα ενός βρόγχου.....	55
Εικόνα 4.9: Απλό αποσυνδεδεμένο ενυδρειοπονικό σύστημα.....	55
Εικόνα 4.10: Αποσυνδεδεμένο ενυδρειοπονικό σύστημα πολλαπλών βρόγχων. ....	56
Εικόνα 4.11: Τιμές pH ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος καθώς και στις ροές νερού. ....	59
Εικόνα 5.1: Λαυράκι ( <i>Dicentrarchus labrax</i> ).....	62
Εικόνα 5.2: Α) <i>Tripolium pannonicum</i> , Β) <i>Plantago coronopus</i> Γ) <i>Salicornia dolichostachya</i> .....	62
Εικόνα 5.3: Τσιπούρα, <i>Sparus aurata</i> .....	64
Εικόνα 5.4: Κρίταμο, <i>Crithmum maritimum</i> .....	64

Εικόνα 5.5: Α) <i>Sesuvium portulacastrum</i> , Β) <i>Batis maritima</i> .....	66
Εικόνα 5.6: Πλατύ, <i>Xiphophorus sp.</i> .....	66
Εικόνα 5.7: Αρμυρήθρα, <i>Salicornia europaea</i> .....	67
Εικόνα 5.8: Αρμυρήθρα, <i>Salicornia bigelovii</i> .....	68
Εικόνα 5.9: Α) <i>Atriplex portulacoides</i> , Β) <i>Lepidium latifolium</i> , Γ) <i>Atriplex halimus</i> . .....	69
Εικόνα 5.10: Α) <i>Capsicum annuum</i> , Β) <i>Brassica oleracea italica</i> . .....	70
Εικόνα 5.11: Παντζάρι, <i>Beta vulgaris var. circa</i> .....	71
Εικόνα 5.12: <i>Hypnea musciformis</i> .....	73
Εικόνα 5.13: <i>Ulva rigida</i> .....	74
Εικόνα 5.14: <i>Gracilaria chilensis</i> .....	75
Εικόνα 5.15: Ασημένιος σολωμός, <i>Oncorhynchus kisutch</i> .....	75
Εικόνα 5.16: Ιριδίζουσα πέστροφα, <i>Oncorhynchus mykiss</i> .....	75
Εικόνα 5.17: <i>Isacia conceptionis</i> .....	76
Εικόνα 5.18: <i>Crassostrea gigas</i> .....	76
Εικόνα 5.19: Καλκάνι, <i>Scophthalmus rhombus</i> .....	77
Εικόνα 5.20: Γλώσσα, <i>Solea senegalensis</i> .....	78



## 1. Εισαγωγή

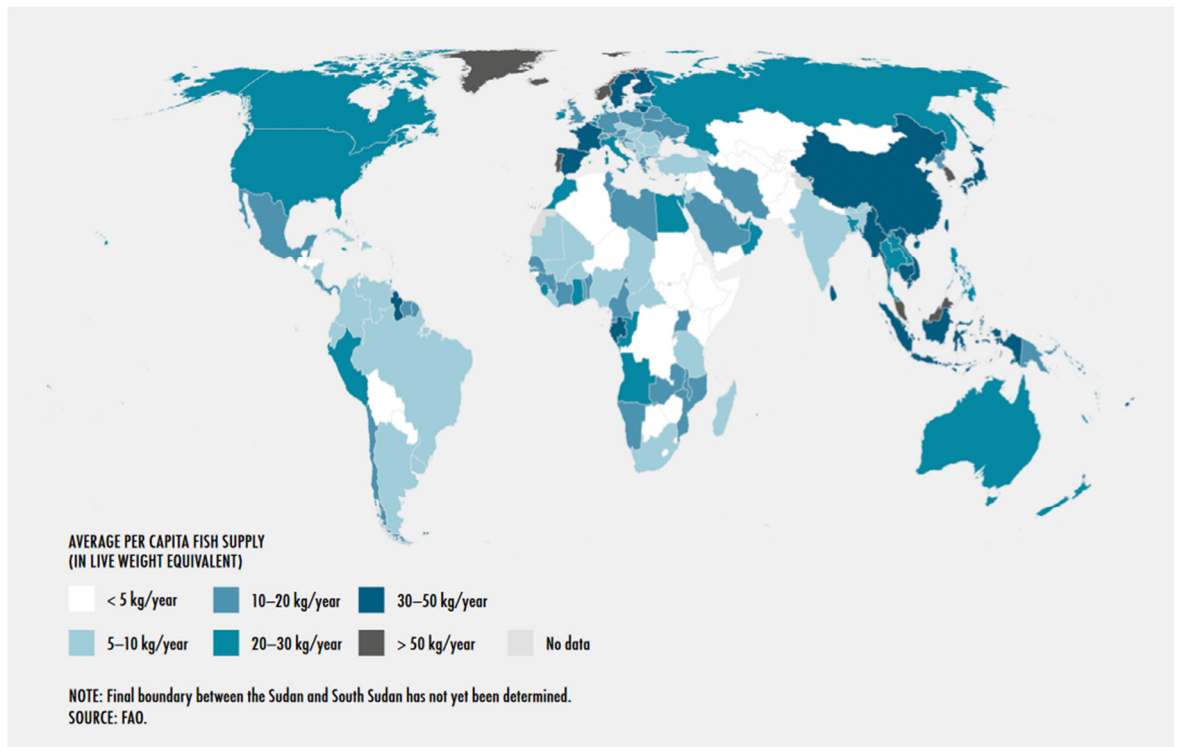
Ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξάνεται με δραματικό ρυθμό, διπλασιάζοντας τον αριθμό του από 3 δισεκατομμύρια στις αρχές της δεκαετίας του 1960 σε 6,5 δισεκατομμύρια το 2008, σήμερα ανέρχεται σε περίπου 7,34 δισεκατομμύρια και αναμένεται να φθάσει τα 10 δισεκατομμύρια έως το 2060 (FAO, 2020; worldometer.info).



Εικόνα 1.1: Εξέλιξη παγκόσμιου πληθυσμού από το 1930 μέχρι το 2060. (Πηγή: [www.worldometers.info](http://www.worldometers.info))

Στις ανεπτυγμένες χώρες η κατανάλωση ψαριών έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με την κατά κεφαλήν κατανάλωση να αυξάνεται από 17,4 κιλά το 1961 σε 24,4 κιλά το 2017 (FAO, 2020). Στις υπό ανάπτυξη χώρες οι αντίστοιχες τιμές είναι μικρότερες. Από 5,2 kg το 1961 σε 19,4 kg το 2017 (FAO, 2020) και η μέση κατανάλωση ψαριών την περίοδο 2015-2017 παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2.

Τα ψάρια θεωρούνται σημαντική πηγή βιταμινών, μετάλλων, πρωτεϊνών και πολυακόρεστων ωμέγα-3 λιπαρών οξέων και έχει αποδειχθεί ότι έχουν θετικά αποτελέσματα στις καρδιακές παθήσεις, στα εγκεφαλικά, στην υψηλή αρτηριακή πίεση, στον μυϊκό εκφυλισμό, σε μερικούς καρκίνους και σε φλεγμονώδεις ασθένειες (Granada et al., 2016). Πάνω από 3 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως λαμβάνουν σήμερα περίπου το 17% – 20% της ζωικής τους πρωτεΐνης (6,5% της συνολικής κατανάλωσης πρωτεΐνης) από ψάρια (Troell et al., 2003).



Εικόνα 1.2: Μέση κατανάλωση ψαριών ανά κάτοικο, την περίοδο 2015-2017. (Πηγή: FAO: the state of world fisheries and aquaculture 2020.

Η ελεύθερη αλιεία αύξησε την παραγωγή της από 20 εκατομμύρια μετρικούς τόνους (Mt) στις αρχές της δεκαετίας του 1950 σε περίπου 90 εκατομμύρια τόνους (70 εκατομμύρια τόνους για χρήση σε τρόφιμα) στα τέλη της δεκαετίας του 1980, παρέχοντας τη συντριπτική πλειονότητα των παγκόσμιων αποθεμάτων ψαριών κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. περίοδος (π.χ. 91% το 1980). Τα επίπεδα παραγωγής της ελεύθερης αλιείας παρέμειναν σταθερά από τα τέλη της δεκαετίας του 1980. Αντίθετα, η υδατοκαλλιέργεια σημείωσε ετήσιο ρυθμό αύξησης της παραγωγής παγκοσμίως 6,3% –7,8% μεταξύ 1990 και 2010 και είναι τώρα ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος τομέας παραγωγής τροφίμων (FAO, 2020; Granada et al., 2016; Troell et al., 2003). Αυτή η ταχεία επέκταση της βιομηχανίας υδατοκαλλιέργειας προέκυψε από: α) τον περιορισμό των άγριων αποθεμάτων ψαριών που φτάνει ή υπερβαίνει το βιώσιμο όριο τους, β) Το υψηλό επίπεδο παγκόσμιων επενδύσεων, γ) την έλλειψη αλιευτικών πολιτικών που να διασφαλίζουν την βιωσιμότητα των αλιευμάτων, δ) τις βελτιώσεις στην τεχνολογία και τη διαχείριση των υδατοκαλλιεργειών, ε) χρήσης καινοτόμων τεχνικών / τεχνολογιών (π.χ. RAS) (Troell et al., 2003). Υπολογίστηκε ότι, το 2011, το 61,3% των αποθεμάτων θαλάσσιων

ψαριών εκμεταλλεύτηκε πλήρως, το 28,8% υπερεκμεταλλεύθηκε και μόνο το 9,9% έμεινε ανεκμετάλλευτο. Επίσης, 13 από τις 15 μεγαλύτερες ωκεάνιες αλιευτικές περιοχές του κόσμου αλιεύονται μέχρι σήμερα, σε βαθμό μεγαλύτερο του ρυθμού αναπλήρωσής τους χωρητικότητας (Granada et al., 2016).

Το 2014, επιτεύχθηκε ένα ορόσημο όταν, για πρώτη φορά, η συμβολή στην παγκόσμια προμήθεια ψαριών για ανθρώπινη κατανάλωση από υδατοκαλλιέργειες (περίπου 74 εκατομμύρια Mt) ξεπέρασε αυτόν από την ελεύθερη αλιεία (περίπου 70 εκατομμύρια τόνους). Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με το 1950, όταν καλλιεργήθηκαν μόνο από 1 εκατομμύριο τόνους ψαριών, καρκινοειδών και μαλακίων σε υδατοκαλλιέργειες (FAO, 2020). Η πλειοψηφία της υδατοκαλλιέργειας σήμερα (κατά χωρητικότητα) πραγματοποιείται σε γλυκό νερό (περίπου 60%), ενώ το υπόλοιπο λαμβάνει χώρα σε θαλασσινό νερό (περίπου 32,3%) και υφάλμυρο νερό (περίπου 7,75%). Οι περισσότερες δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας πραγματοποιούνται στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού (88% –89% του όγκου), με τη συντριπτική πλειονότητα να συμβαίνει στην Κίνα (60% –62% κατ' όγκο & 51% κατά παγκόσμια αξία) (FAO, 2020; Troell et al., 2003). Η παραγωγή από υδατοκαλλιέργειες αποτελείται κυρίως από ψάρια γλυκού νερού (περίπου 55%) και θαλάσσια / υφάλμυρα μαλάκια (περίπου 25%), ψάρια αλμυρού νερού (10%) και καρκινοειδή (9,5%) (FAO, 2020). Ωστόσο, η υδατοκαλλιέργεια θαλασσινού νερού πιθανότατα θα αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες, καθώς οι παγκόσμιες προμήθειες γλυκού νερού συνεχίζουν να μειώνονται (FAO, 2020).

Καθώς ο ανθρώπινος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται και η βιομηχανία αλίευσης μειώνεται, η εξάρτηση από τα εκτρεφόμενα ψάρια ως βασική πηγή πρωτεΐνης θα αυξηθεί επίσης. Η υδατοκαλλιέργεια έχει έναν αριθμό πιθανών θετικών επιπτώσεων όπως: μείωση πίεσης στα άγρια αποθέματα, ανοικοδόμηση των εξαντλημένων άγριων αποθεμάτων, επεξεργασία λυμάτων (π.χ. σε RAS), παροχή προσιτής πρωτεΐνης και εισοδήματος με βάση τα ψάρια. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης δυνητικά αρνητικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά, οικονομικά και προβλήματα που προκύπτουν από τις υδατοκαλλιέργειες (κυρίως δραστηριότητες μονοκαλλιέργειας). Μερικές από τις κύριες ανησυχίες περιλαμβάνουν: τα περιβαλλοντικά επιβλαβή επίπεδα απόρριψης λυμάτων, την κατανάλωση νερού, τις διαφυγές ψαριών εκτροφής, την μετάδοση παρασίτων και ασθενειών, την παρουσία ρύπων, την

εξάρτηση από άγρια ψάρια για ιχθυάλευρα και ιχθυέλαια στις ιχθυοτροφές μιας υδατοκαλλιέργειας, και αρνητικές επιπτώσεις στην απασχόληση και στο εισόδημα (Bell et al., 2006). Για να εξασφαλιστεί η αιεφόρος ανάπτυξη της βιομηχανίας υδατοκαλλιέργειας, είναι υψίστης σημασίας η ανάπτυξη τεχνολογιών και συστημάτων παραγωγής που μετριάζουν αυτές τις επιπτώσεις.

### **1.1 Συστήματα Υδατοκαλλιέργειας με Ανακυκλοφορία νερού.**

Η έλλειψη χώρου για επέκταση, ο ανταγωνισμός για ευνοϊκές περιοχές, οι ανησυχίες για τη ρύπανση και το υψηλό κόστος που συνδέεται με την άντληση μεγάλων όγκων νερού (π.χ., σε χερσαίες υδατοκαλλιέργειες) αποτελούν σημαντικά εμπόδια για τη βιώσιμη επέκταση τη βιομηχανία της υδατοκαλλιέργειας αλμυρού νερού (Badiola et al., 2012). Μια αποτελεσματική λύση είναι η εκτροφή ψαριών σε συστήματα υδατοκαλλιεργείων με ανακυκλοφορία νερού, γνωστά και ως (RAS). Από τους Zhang et al. (2011) τα RAS ορίζονται ως «χερσαία υδρόβια συστήματα όπου το νερό (μερικώς) επαναχρησιμοποιείται μετά από μηχανική και βιολογική επεξεργασία σε μια προσπάθεια να μειωθεί η κατανάλωση νερού και ενέργειας και η απελευθέρωση θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον» (Zhang et al., 2011) . Σε γενικές γραμμές, με τα RAS, μεγάλα στερεά σωματίδια τροφής, κόπρανα και βακτήρια που δεν καταναλώνονται, συμπυκνώνονται και απομακρύνονται με καθίζηση ή μηχανική διήθηση και τα λεπτά σωματίδια (<100 μm) απομακρύνονται με επεξεργασία με όζον και / ή κλασμάτωση αφρού. Ορισμένες μορφές διαλυμένων αζωτούχων αποβλήτων (δηλ. Αμμωνίας και νιτροδών) που είναι τοξικές για τα ψάρια απομακρύνονται από τα λύματα σε βιολογικά φίλτρα που περιέχουν νιτροποιητικά βακτήρια. Λεπτομερής ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των RAS γίνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Τα RAS έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας. Μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση νερού επιτρέποντας την ανακύκλωση έως και 90% –99% του νερού και η χρήση αλμυρού νερού μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 16 L / kg ψαριού. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας που χρησιμοποιούν 3000-45.000 λίτρα νερού / kg θαλασσινών (Badiola et al., 2012). Τα RAS είναι ευέλικτα. Λόγω αυτής της χαμηλής ζήτησης νερού, και μπορούν να εγκατασταθούν σε γη ακατάλληλη για άλλες μεθόδους παραγωγής τροφίμων όπως, ερήμους, εδάφη μετά

την εξόρυξη, αστικές περιοχές ή/και κοντά σε αγορές, με αποτέλεσμα τοπικές ευκαιρίες απασχόλησης και εσόδων και μειωμένα έξοδα μεταφοράς (FAO, 2020). Βελτιώνουν τις ευκαιρίες για διαχείριση αποβλήτων, ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και έλεγχο βιολογικής ρύπανσης. Η πλειονότητα των υπερβολικών θρεπτικών ουσιών και απορριμμάτων (υπολείμματα ζωοτροφών, κόπρανα, νεκρά βακτήρια) απομακρύνονται προτού απελευθερωθεί νερό στο περιβάλλον και επομένως τα RAS μειώνουν τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον και τα οικοσυστήματα (Badiola et al., 2012; FAO, 2020). Τα RAS μπορούν να επιτρέψουν υψηλότερες πυκνότητες ψαριών από ό, τι τα περισσότερα συστήματα υδατοκαλλιέργειας (Martins et al., 2010) αποστειρώνοντας το νερό πριν από την (επαν)είσοδο στις δεξαμενές ψαριών, αφαιρώντας τα παθογόνα και τους μολυσματικούς παράγοντες, μειώνοντας τον κίνδυνο εκδήλωσης νόσων και πρόσληψης ρύπων από ψάρια (Martins et al., 2010).

## **1.2 Υδροπονία**

Η υδροπονία είναι η τεχνική της καλλιέργειας φυτών σε ένα θρεπτικό διάλυμα (π.χ. νερό που περιέχει λιπάσματα) με ή χωρίς τη χρήση ανόργανου/αδρανούς υλικού όπως άμμο, χαλίκι, κοκοφοίνικα ή περλίτη, ή με τη χρήση οργανικού υλικού, όπως, τύρφη, κοκοφοίνικα καρύδας για μηχανική υποστήριξη (Jones Jr, 2016). Όταν ένα υδροπονικό σύστημα δεν περιέχει κανένα μέσο, συχνά αναφέρεται ως ένα υγρό υδροπονικό σύστημα, όταν περιέχει ένα μέσο, συχνά αναφέρεται ως ένα αδρανές υδροπονικό σύστημα (Jones Jr, 2016). Η έννοια της καλλιέργειας φυτών σε πλούσιο σε θρεπτικά νερό είναι πολύ παλιά. Για παράδειγμα, οι κρεμαστοί κήποι της Βαβυλώνας και οι πλωτοί κήποι των Αζτέκων στο Μεξικό ήταν συστήματα υδροπονίας (Jones Jr, 2016). Η βασική ιδέα της υδροπονίας καθιερώθηκε το 1800 από τους πρώτους γεωπόνους. Ορισμένες δημοσιεύσεις του Καλιφορνέζου επιστήμονα, Gericke, διέδωσαν την ιδέα της καλλιέργειας φυτών χωρίς μέσο ανάπτυξης τη δεκαετία του 1930 (Gericke, 1937). Ωστόσο, μόλις η δεκαετία του 1980 η υδροπονία έγινε μια κερδοφόρα εμπορική μέθοδος παραγωγής λαχανικών και λουλουδιών (Jones Jr, 2016). Η λειτουργία των υδροπονικών συστημάτων σε ελεγχόμενες εγκαταστάσεις (π.χ. θερμοκήπια) αναπτύχθηκε από τον στρατό των ΗΠΑ μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ως μια βιομηχανική προσέγγιση στην εντατικοποίηση

της αγροτικής παραγωγής (Jones Jr, 2016). Σχεδόν όλα τα υδροπονικά συστήματα σε εύκρατες περιοχές λειτουργούν σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις για:

- Έλεγχο της θερμοκρασίας,
- μείωση της απώλειας νερού με εξάτμιση,
- Έλεγχο ασθενειών και παρασίτων
- και προστασία από δυσμενείς καιρικές συνθήκες (π.χ. άνεμος και βροχή).

### **1.3 Ενυδρειοπονία (aquaponics)**

Η ενυδρειοπονία είναι ένα σύστημα ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (integrated multi-trophic aquaculture, IMTA) στην ξηρά που συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια παραγωγής υδρόβιων ζώων όπως, ψάρια, караβίδες, μαλάκια κ.λπ. με την υδροπονική παραγωγή φυτών όπως λαχανικά, βότανα, φρούτα, φαρμακευτικά φυτά κ.λπ. Τα απόβλητα που παράγονται από την υδατοκαλλιέργεια υπολείμματα τροφών, περιττώματα, νεκρά βακτήρια) παρέχουν τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ τα φυτά απομακρύνουν τοξικές ενώσεις (π.χ. νιτρικά και φωσφόρος) που προκύπτουν από τα απόβλητα των υδρόβιων ζώων (Goddek, 2017). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα ενυδρειοπονικά συστήματα είναι κλειστά συστήματα ανακυκλοφορίας, τα οποία επιτρέπουν τη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών σε συγκεντρώσεις επαρκείς για την παραγωγή υδροπονικών φυτών (Goddek, 2017).

Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων αναλύει τα πιθανά ζητήματα που σχετίζονται με τις νέες τάσεις στην παραγωγή τροφίμων και η ενυδρειοπονία αναγνωρίστηκε ως μια νέα διαδικασία / πρακτική παραγωγής τροφίμων πολλά υποσχόμενη (Afonso et al., 2017). Η ενυδρειοπονία έχει αποκτήσει δυναμική λόγω των ανώτερων χαρακτηριστικών της σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής. Έτσι, η ενυδρειοπονία φαίνεται ικανή να διατηρήσει τα οικοσυστήματα και να ενισχύσει την ικανότητα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, τις ακραίες καιρικές συνθήκες, την ξηρασία, τις πλημμύρες και άλλες καταστροφές. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι θεμιτά, αλλά όπως και σε άλλες γεωργικές / υδατοκαλλιέργειες εφαρμογές, η ενυδρειοπονία δεν είναι απαλλαγμένη από κινδύνους. Δεδομένης της πολυπλοκότητάς της ως περιβάλλον για τη συμπαραγωγή υδρόβιων ζώων με φυτά, οι κίνδυνοι και τα ρίσκα μπορεί να είναι πολλοί και

περίπλοκοι (Martins et al., 2010).

Όπως και στην υδροπονία, οι ενυδρειοπονικές εργασίες πραγματοποιούνται συνήθως σε ελεγχόμενο περιβάλλον (π.χ. θερμοκήπια) σε μια προσπάθεια αύξησης των αποδόσεων της παραγωγής των καλλιεργειών (Love et al., 2014). Η ενυδρειοπονία επηρεάστηκε επίσης από τις εργασίες πάνω σε συστήματα RAS που πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Μια σημαντική πρόκληση για τα RAS είναι η συσσώρευση αζωτούχων ενώσεων, οι οποίες είναι δυνητικά τοξικές για τα ψάρια. Ορισμένοι ερευνητές πειραματίστηκαν με την καλλιέργεια των φυτών χωρίς μέσο ανάπτυξης, ως λύση επεξεργασίας απορριμμάτων ψαριών για την απομάκρυνση αζωτούχων ενώσεων, σηματοδοτώντας την αρχή της ενυδρειοπονίας όπως την γνωρίζουμε σήμερα [248–253]. Από τη στιγμή που διεξήχθη αυτή η έρευνα, οι μηχανικοί έχουν αναπτύξει βιο-φίλτρα που δεν βασίζονται σε φυτά, ωστόσο, τα ενυδρειοπονικά συστήματα βελτιώνουν την ποιότητα του νερού παράγοντας παράλληλα μια επιπλέον, δυνητικά κερδοφόρα καλλιέργεια, διακρίνοντάς την από άλλες μορφές RAS (Love et al., 2014). Η ανάπτυξη της ενυδρειοπονίας επηρεάστηκε επίσης από έρευνες που διεξήχθησαν για τη βιώσιμη γεωργία, στις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Ερευνητές στο Ινστιτούτο New Alchemy εφάρμοζαν μεθόδους καλλιέργειας σε υδατοκαλλιέργειες και πειραματίστηκαν με την ενσωμάτωση της υδροπονίας και της υδατοκαλλιέργειας (Love et al., 2014).

Τα ψάρια σε ενυδρειοπονικά συστήματα συνήθως εκτρέφονται σε δεξαμενές ή άλλες μορφές δοχείων, ενώ τα φυτά καλλιεργούνται χωριστά σε υδροπονικές δεξαμενές. Οι ρίζες είτε βυθίζονται στο νερό είτε, στην περίπτωση συστήματος αεροπονικού τύπου, εκτίθενται σε ομίχλη ή ψεκασμό νερού. Τα φυτά στερεώνονται σε χαλίκι, άμμο, περλίτη, πορώδη πλαστικά φιλμ ή σε πλωτές σχεδίες.

Όλα τα ενυδρειοπονικά συστήματα έχουν τις ίδιες βασικές λειτουργίες: παραγωγή υδρόβιων ζώων και φυτών, βακτηριακή νιτροποίηση και αφαίρεση αιωρούμενων στερεών (Grabner and Junge, 2009). Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται από τα υδάτινα συστήματα με παρόμοιο τρόπο με τα RAS, περνώντας τα λύματα μέσω μηχανικών φίλτρων ή χρησιμοποιώντας δεξαμενές καθίζησης για την απομάκρυνση των στερεών από το εναιώρημα. Όπως και στα RAS, η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά με νιτροποιητικά βακτήρια. Το πλούσιο σε νιτρικά και φωσφόρο νερό μεταφέρεται στις υδροπονικές

δεξαμενές για απορρόφηση από τα φυτά. Το νερό των φυτών έχοντας μειωμένες θρεπτικές ουσίες στη συνέχεια επαναχρησιμοποιείται στις δεξαμενές ψαριών. Λόγω της ικανότητας της ενυδρειοπονίας να επεξεργάζεται τα λύματα των ψαριών για επαναχρησιμοποίηση στο σύστημα, τα ενυδρειοπονικά συστήματα μπορούν να επιτύχουν πυκνότητες παραγωγής ψαριών παρόμοιες με αυτές που επιτυγχάνονται στα RAS (Graber and Junge, 2009).



## 2. Συστήματα Υδατοκαλλιέργειας με Ανακυκλοφορία (RAS)

### 2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούν συχνά τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) που αποτελούν την βάση της ενυδρειοπονίας και θα πρέπει να γίνει επεξήγηση του τι είναι και ποια η λειτουργία και χρησιμότητά τους. Τα συστήματα RAS ξεκίνησαν να αναπτύσσονται πριν από 40 χρόνια αλλά τα τελευταία 20 χρόνια η εξέλιξή τους έχει επιταχυνθεί ραγδαία. Απαρτίζονται από τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν αρχικά για την διαχείριση λυμάτων και τις υδατοκαλλιέργειες και επεκτάθηκαν μετά και στα ενυδρειοπονικά συστήματα.

Τα συστήματα (RAS) είναι εντατικά συστήματα παραγωγής ψαριών τα οποία χρησιμοποιούν μια σειρά βημάτων επεξεργασίας νερού για την αποβολή του νερού εκτροφής ψαριών και μετέπειτα τη διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίησής του. Το RAS συνήθως περιλαμβάνει:

1. Συσκευές για την απομάκρυνση στερεών σωματιδίων από το νερό που αποτελούνται από κόπρανα ψαριών, τροφές που δεν καταναλώθηκαν και βακτηριακά σωματίδια (Chen et al., 1994; Couturier et al., 2009).
2. Βιοφίλτρα νιτροποίησης για την οξείδωση της αμμωνίας που προέρχεται από τα ψάρια σε νιτρικά (Gutierrez-Wing & Malone, 2006).
3. Μια σειρά συσκευών ανταλλαγής αερίων για την απομάκρυνση του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα που εκλύθηκε από τα ψάρια καθώς και/ή την προσθήκη οξυγόνου που απαιτείται από τα ψάρια και τα βακτηρίδια νιτροποίησης (Colt and Watten, 1988; Moran, 2010; Summerfelt, 2003).

Επιπρόσθετα, τα RAS μπορεί να περιλαμβάνουν:

1. Συστήματα υπεριώδους ακτινοβολίας για την απολύμανση του νερού (Sharrer et al., 2005; Summerfelt, 2003)
2. Οξονισμού και πρωτεϊνικής απομάκρυνσης για λεπτά στερεά και μικροβιακό έλεγχο (Attramadal et al., 2012; Gonçaves and Gagnon, 2011)
3. Συστήματα απονιτροποίησης για την απομάκρυνση των νιτρικών (van Rijn et al., 2006).

Η τεχνολογία RAS αναπτύσσεται για περισσότερα από 40 χρόνια, αλλά οι νέες τεχνολογίες προσφέρουν όλο και περισσότερους τρόπους για να αλλάξουν τα πρότυπα των παραδοσιακών RAS, συμπεριλαμβανομένων βελτιώσεων σε κλασικές διεργασίες όπως η σύλληψη στερεών, το φιλτράρισμα και η ανταλλαγή αερίων. Τα RAS γνώρισαν επίσης σημαντικές εξελίξεις όσον αφορά την κλίμακα, τις παραγωγικές ικανότητες και την αποδοχή της αγοράς, με τα συστήματα να γίνονται προοδευτικά μεγαλύτερα και πιο ισχυρά.

## **2.2 Σύσταση ενός συστήματος RAS**

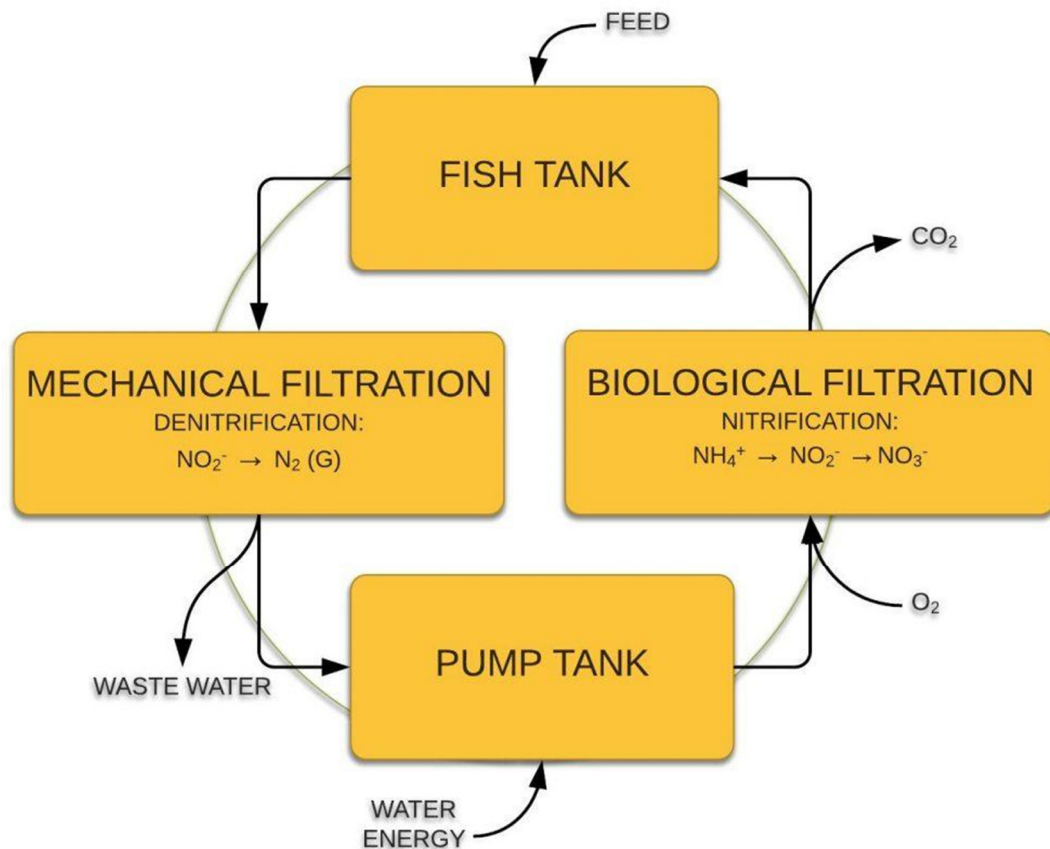
Σε ένα σύστημα RAS το νερό της υδατοκαλλιέργειας καθαρίζεται και επαναχρησιμοποιείται συνεχώς. Ένα σύστημα RAS είναι ένα σχεδόν τελείως κλειστό κύκλωμα. Τα παραχθέντα απόβλητα, στερεά, αμμωνιακά και CO<sub>2</sub>, είτε αφαιρούνται είτε μετατρέπονται σε μη τοξικά προϊόντα από τα μέρη του συστήματος. Το καθαρισμένο νερό στη συνέχεια κορεσμένο με οξυγόνο επιστρέφεται στις δεξαμενές ψαριών. Με την ανακύκλωση του νερού της υδατοκαλλιέργειας, οι ανάγκες σε νερό και ενέργεια περιορίζονται στο ελάχιστο. Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να σχεδιαστεί ένα πλήρως κλειστό σύστημα ανακυκλοφορίας. Τα μη αποικοδομήσιμα απόβλητα πρέπει να αφαιρεθούν και το εξατμισμένο νερό πρέπει να αντικατασταθεί. Τα συστήματα ανακυκλοφορίας είναι ικανά να επαναχρησιμοποιήσουν μέχρι και το 90% ή περισσότερο του νερού της καλλιέργειας. Για να εξασφαλιστεί καλός καθαρισμός του νερού, τα συστήματα ανακυκλοφορίας αποτελούνται από έναν αριθμό εξαρτημάτων με συγκεκριμένες λειτουργίες. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος RAS είναι τα εξής:

1. Πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον για τα ψάρια
2. Χαμηλή χρήση νερού
3. Αποτελεσματική χρήση ενέργειας
4. Αποτελεσματική χρήση γης
5. Βέλτιστη στρατηγική σίτισης ψαριών
6. Εύκολη ταξινόμηση και συγκομιδή ψαριών
7. Πλήρης έλεγχος ασθενειών

Από την άλλη πλευρά τα μειονεκτήματά τους είναι τα εξής:

1. Αναγκαιότητα για ηλεκτρική ενέργεια 24/7.
2. Απαιτείται καλή πηγή νερού, κατά προτίμηση γεώτρηση.
3. Απαιτείται καλής ποιότητας τροφή ψαριών, κατά προτίμηση με υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και λίπος με υψηλή πεπτικότητα.
4. Τεχνικά καταρτισμένο προσωπικό ικανό να εργαστεί σε περιβάλλον μεσαίας τεχνολογίας

Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα RAS παρουσιάζονται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Βασικά μέρη ενός συστήματος RAS. (Πηγή: [www.aquacultureid.com](http://www.aquacultureid.com))

### 2.2.1 Δεξαμενή ψαριών (fish tank)

Η δεξαμενή ψαριών περιέχει τα ψάρια που εκτρέφονται και εκεί γίνεται η σίτιση. Η τροφή μέσω του μεταβολισμού μετατρέπεται σε περιττώματα και αμμωνιακές ενώσεις που μαζί με υπολείμματα τροφής, άλγη, μικροοργανισμούς και

σωματικά κατάλοιπα ψαριών, αποτελούν σωματίδια που πρέπει να αφαιρεθούν με φιλτράρισμα ώστε το νερό να μπορέσει να ξαναχρησιμοποιηθεί.

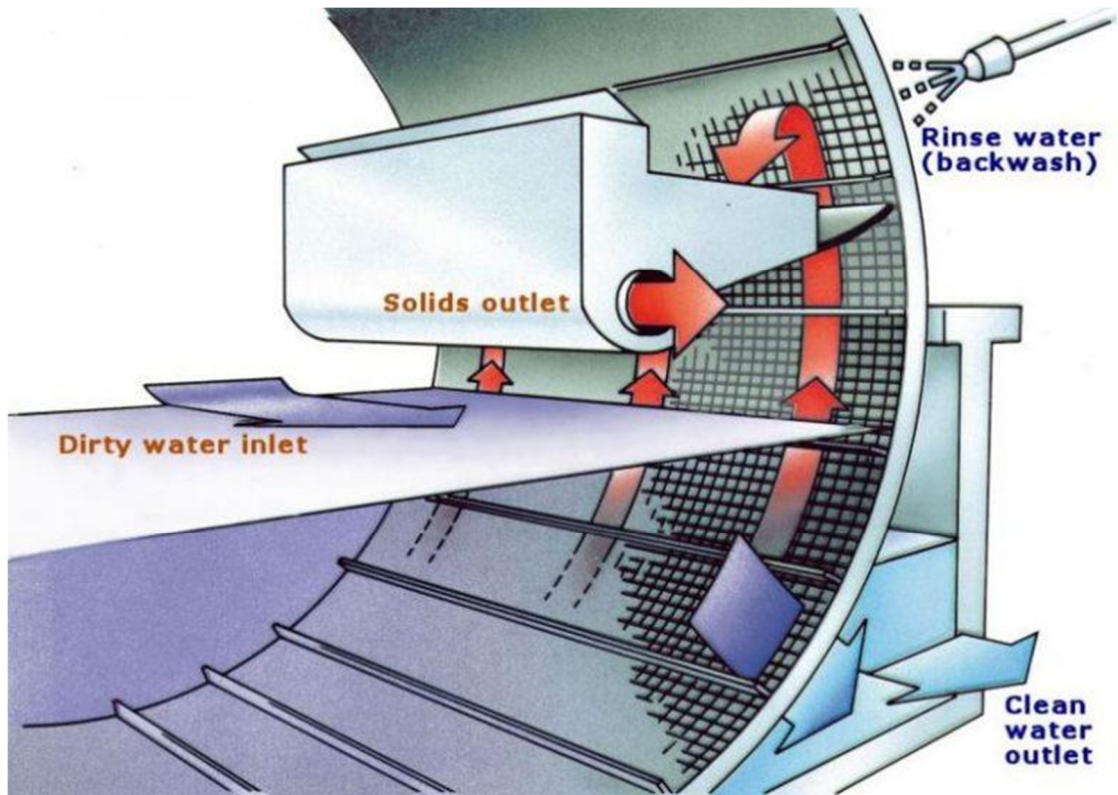
### **2.2.2 Μηχανικό φίλτρο**

Το μηχανικό φίλτρο χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών από το νερό του συστήματος. Αυτά τα στερεά, κυρίως τα κόπρανα, πρέπει να αφαιρεθούν για να διατηρηθεί η ποιότητα του νερού. Ανάλογα με την κατάσταση είτε επιλέγουμε φίλτρο τυμπάνου ή φίλτρα καθίζησης.

Φίλτρο καθίζησης: Το νερό από τις δεξαμενές ψαριών οδηγείται στη δεξαμενή καθίζησης. Σε αυτήν τη δεξαμενή τα μη διαλυτά, στερεά σωματίδια διαχωρίζονται από το νερό του συστήματος χρησιμοποιώντας την βαρύτητα. Η δεξαμενή καθίζησης είναι γεμάτη με ένα ειδικά προσαρμοσμένο φίλτρο πολυπροπυλενίου και τα στερεά αφήνονται να κατακαθίσουν σε αυτά τα φίλτρα. Τα καθήμενα σωματίδια σχηματίζουν ένα στρώμα λάσπης στο κάτω μέρος της δεξαμενής καθίζησης. Αυτή η λάσπη είναι βιολογικά πολύ δραστική: έως και το 60% των νιτρικών που παράγονται από το βιολογικό φίλτρο απονιτροποιούνται από τα βακτήρια της λάσπης σε αέριο άζωτο. Ανάλογα με το φορτίο του συστήματος, η δεξαμενή καθίζησης πρέπει να καθαρίζεται τακτικά. Η λάσπη και το νερό για τον καθαρισμό της συνήθως απορρίπτονται στο σύστημα αποχέτευσης λυμάτων του αγροκτήματος. Μετά από αυτή τη μηχανική επεξεργασία, το νερό του συστήματος ρέει στο επόμενο στάδιο του φίλτρου.

Τυμπανοειδές φίλτρο: Το νερό του συστήματος που προέρχεται από τις δεξαμενές ψαριών μπορεί επίσης να καθαριστεί μηχανικά χρησιμοποιώντας ένα τυμπανοειδές φίλτρο. Τα αιωρούμενα στερεά αφαιρούνται συνεχώς και αυτόματα από το νερό του συστήματος και ως εκ τούτου το φίλτρο δεν απαιτεί καθημερινή συντήρηση. Το μειονέκτημα ενός φίλτρου είναι η συνεχής ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τυμπανοειδές φίλτρο το νερό περνά το πλαίσιο φίλτρου (Εικόνα 2.2, μπλε βέλος). Σε αυτήν τη διαδικασία, τα σωματίδια στο νερό του συστήματος μπλοκάρουν από το φίλτρο. Λόγω της απόφραξης του φίλτρου, η στάθμη του νερού μέσα στο τύμπανο θα αυξηθεί. Ως αποτέλεσμα, ο μηχανισμός έκπλυσης τίθεται σε λειτουργία και το τύμπανο αρχίζει να περιστρέφεται και από το εξωτερικό μέρος του τυμπάνου ψεκάζεται νερό υπό υψηλή πίεση από τα ακροφύσια μέσω του υφάσματος του φίλτρου, ξεπλένοντας τα απορρίμματα σωματιδίων από το πλαίσιο του φίλτρου.

Μαζί με τα σωματίδια απορριμμάτων το νερό απορρίπτεται στην υδρορροή. Μπορούν να επιλεγούν διαφορετικές πλαίσια φίλτρου ανάλογα με τα είδη ψαριών και το μέγεθος των ψαριών.



Εικόνα 2.2: Τυμπανοειδές φίλτρο (Πηγή: [www.aquacultureid.com](http://www.aquacultureid.com))



Εικόνα 2.3: Εσωτερικό τυμπανοειδούς φίλτρου όπου φαίνεται το πλαίσιο με το φίλτρο. (Πηγή: [www.aquacultureid.com](http://www.aquacultureid.com))

### 2.2.3 Βιολογικό Φίλτρο

Η  $\text{NH}_4$  ή αλλιώς αμμώνιο παράγεται από τα ψάρια κατά την πέψη της τροφής. Είναι ένα απόβλητο της πέψης των πρωτεϊνών και είναι τοξικό για τα ψάρια. Χρησιμοποιείται ωστόσο από ορισμένα βακτήρια για παραγωγή ενέργειας. Αυτά τα βακτήρια υπάρχουν στον biotower του συστήματος ανακυκλοφορίας και μετατρέπουν το  $\text{NH}_4$  σε νιτρώδες άλας,  $\text{NO}_2$ , σε ένα αναερόβιο περιβάλλον. Όπως το αμμώνιο, το διοξείδιο του αζώτου είναι τοξικό για τα ψάρια σε υψηλά επίπεδα, αλλά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Το  $\text{NO}_2$  χρησιμοποιείται επίσης ως πηγή ενέργειας για ορισμένα βακτήρια στο βιολογικό φίλτρο. Αυτά τα βακτήρια μετατρέπουν τα  $\text{NO}_2$  στο σχετικά αβλαβές νιτρικό ( $\text{NO}_3$ ). Σε ένα σύστημα ανακυκλοφορίας υπάρχουν μέρη όπου αυτά τα βακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν σε βέλτιστες συνθήκες. Όπως στο φίλτρο biotower και στο φίλτρο κινούμενης κλίνης (επίσης γνωστό ως φίλτρο ανεφοδιασμού).

**Biotower:** Από τη δεξαμενή της αντλίας, το νερό του συστήματος αντλείται πρώτα στο biotower, επίσης γνωστό ως πύργος απαέρωσης. Ένας biotower αποτελείται από μπλοκ φίλτρων καθαρού πολυπροπυλενίου κατάλληλα για βιοδιήθηση. Πάνω από τον biotower το νερό ψεκάζεται πάνω από το φίλτρο. Το νερό ρέει μέσω του φίλτρου στη δεξαμενή υποδοχής ή απευθείας πίσω στη δεξαμενή της αντλίας. Ένα βιοφίλμ βακτηριδίων νιτροποίησης σχηματίζεται στην επιφάνεια των φίλτρων. Μπορεί επίσης να προστεθεί ένας επιπλέον biotower στο σύστημα για την αφαίρεση διαλυτών αερίων (δηλ.  $\text{CO}_2$ ) από το νερό. Σε αυτήν την περίπτωση, μιλάμε για έναν πύργο απαέρωσης.



Εικόνα 2.4: Biotower (μπλε δεξαμενή) με τα φίλτρα στο εσωτερικό. (Πηγή: [www.aquacultureid.com](http://www.aquacultureid.com))

### 2.3 Έλεγχος ποιότητας νερού μέσω RAS

Τα RAS είναι σύνθετα συστήματα υδάτινης παραγωγής που περιλαμβάνουν μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών αλληλεπιδράσεων (Ebeling et al., 2010). Η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων και των σχέσεων μεταξύ των ψαριών-συστήματος παραγωγής-και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη τυχόν αλλαγών στην ποιότητα του νερού και στην απόδοση του συστήματος. Υπάρχουν περισσότερες από 40 παράμετροι ποιότητας νερού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της ποιότητας του νερού στην υδατοκαλλιέργεια (Ebeling et al., 2010). Από αυτές, μόνο λίγες παραδοσιακά ελέγχονται στις κύριες διαδικασίες ανακυκλοφορίας διότι αυτές οι διαδικασίες μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την επιβίωση των ψαριών και είναι επιρρεπείς σε αλλαγές με την προσθήκη τροφής στο σύστημα. Πολλές άλλες παράμετροι ποιότητας νερού δεν παρακολουθούνται ή ελέγχονται κανονικά επειδή:

1. Η ανάλυση ποιότητας του νερού μπορεί να είναι ακριβή.
2. Ο προς ανάλυση ρύπος μπορεί να αραιωθεί με καθημερινή ανταλλαγή νερού.
3. Αποκλείονται πιθανές πηγές νερού που τις περιέχουν
4. Επειδή οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις τους δεν έχουν παρατηρηθεί στην πράξη.

Συνήθως οι παράμετροι ποιότητας νερού που παρακολουθούνται κανονικά στο RAS είναι α) το διαλυτό οξυγόνο, β) η αμμωνία, γ) τα βιοστερεά, δ) το διοξείδιο του άνθρακα, ε) η ολική πίεση των αερίων, στ) τα νιτρικά, ζ) η αλκαλικότητα.

### **2.3.1 Διαλυτό οξυγόνο**

Το διαλυτό οξυγόνο (DO) είναι γενικά η πιο σημαντική παράμετρος ποιότητας του νερού στην ενυδρείοποιία, καθώς τα χαμηλά επίπεδα DO μπορεί γρήγορα να προκαλέσουν στρες στα ψάρια, δυσλειτουργία στα φίλτρα νιτροποίησης και σημαντικές απώλειες ψαριών. Συνήθως, η πυκνότητα εκτροφής, η προσθήκη τροφής, η θερμοκρασία και η ανοχή των ειδών ψαριών στην υποξία, καθορίζουν τις απαιτήσεις ενός συστήματος σε οξυγόνο. Καθώς το οξυγόνο μπορεί να υπερβεί στο νερό την συγκέντρωση κορεσμού του υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες (υπερκορεσμός), υπάρχει μια σειρά συσκευών και σχεδίων για να διασφαλιστεί ότι τα ψάρια διαθέτουν επαρκές οξυγόνο.

Σε ένα σύστημα RAS, το DO μπορεί να ελέγχεται μέσω αερισμού, προσθήκης καθαρού οξυγόνου ή συνδυασμού και των δύο. Δεδομένου ότι ο αερισμός είναι ικανός να αυξάνει τις συγκεντρώσεις του DO στο ατμοσφαιρικό σημείο κορεσμού, η τεχνική αυτή γενικά προορίζεται για ελαφρός φορτωμένα συστήματα ή συστήματα με ανθεκτικά είδη όπως τιλάπια και γατόψαρο. Ωστόσο, οι συσκευές παροχής αέρα είναι επίσης ένα σημαντικό μέρος των εμπορικών RAS όπου αντί της χρήσης ακριβού συμπιεσμένου οξυγόνου, γίνεται αερισμός του νερού με αέρα χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο μέχρι το σημείο κορεσμού και αποφεύγεται ο υπερκορεσμός σε περίπτωση χρήσης συμπιεσμένου οξυγόνου.

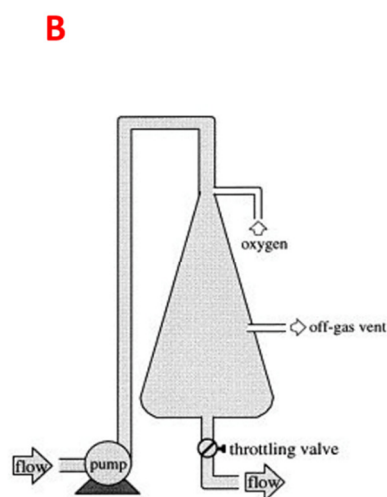
Υπάρχουν διάφοροι τύποι αεριστήρων και οξυγονωτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα RAS και αυτοί εμπίπτουν σε δύο ευρείες κατηγορίες: συστήματα αερίου-υγρού και υγρού-προς-αέριο (Lekang, 2013). Οι αεριστές αερίου προς υγρό περιλαμβάνουν κυρίως συστήματα διάχυτου αερισμού όπου το αέριο (αέρας ή οξυγόνο) μεταφέρεται στο νερό, δημιουργώντας φυσαλίδες που ανταλλάσσουν αέρια με το υγρό μέσο. Άλλα συστήματα αερίου-υγρού περιλαμβάνουν διέλευση αερίων μέσω διαχυτών, διάτρητων σωλήνων (Εικόνα 2.5) ή διάτρητων πλακών για τη δημιουργία φυσαλίδων, ή χρησιμοποιώντας εγχυτήρες Venturi (Εικόνα 2.6A) που δημιουργούν μάζες μικρών φυσαλίδων, ή συσκευών που



παγιδεύουν φυσαλίδες αερίου στη ροή του νερού όπως ο κώνος Speece (Εικόνα 2.6B) και ο οξυγονωτής με σωλήνα-U.



Εικόνα 2.5: Πλάκα διάχυσης οξυγόνου (Πηγή: [www.taiwantrade.com](http://www.taiwantrade.com))



Εικόνα 2.6: A) Εγχυτήρες Venturi, B) Κώνος Speece. (Πηγή: [purehydroponics.com](http://purehydroponics.com))

### 2.3.2 Αμμωνία

Μέσα στο νερό, η αμμωνία υπάρχει σε δύο μορφές: μια μη ιονισμένη μορφή ( $\text{NH}_3$ ) που είναι τοξική για τα ψάρια και μια ιονισμένη μορφή ( $\text{NH}_4^+$ ) που έχει χαμηλή τοξικότητα στα ψάρια. Αυτές οι δύο ενώσεις σχηματίζουν το ολικό αμμωνιακό άζωτο (Total Ammonia Nitrogen, TAN), και η αναλογία μεταξύ των δύο μορφών ελέγχεται από το pH, τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Η αμμωνία συσσωρεύεται στο νερό ως προϊόν του μεταβολισμού των πρωτεϊνών της ιχθυοτροφής από τα ψάρια (Altinok

και Grizzle 2004) και μπορεί να φθάσει σε τοξικές συγκεντρώσεις εάν αφηθεί χωρίς έλεγχο. Από τους 35 διαφορετικούς τύπους ψαριών γλυκού νερού που έχουν μελετηθεί, η μέση τιμή οξείας τοξικότητας για την αμμωνία είναι 2,79 mg NH<sub>3</sub>/l (Randall and Tsui, 2002).

Η αμμωνία παραδοσιακά επεξεργάζεται σε συστήματα ανακυκλοφορίας με νιτροποιητικά βιολογικά φίλτρα, συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για την χρήση μικροβιακών κοινοτήτων που μπορούν να οξειδώσουν την αμμωνία σε νιτρική μορφή (NO<sub>3</sub>). Άλλες εξαιρετικά καινοτόμες τεχνικές για τη μείωση της αμμωνίας έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, αλλά δεν εφαρμόζονται ευρέως στο εμπόριο.

Η αμμωνία οξειδώνεται στα βιολογικά φίλτρα από κοινότητες βακτηρίων νιτροποίησης. Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι χημειολιθοτροφικοί οργανισμοί που περιλαμβάνουν είδη των γενών *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrobacter* και *Nitrococcus* (Prosser, 1990). Αυτά τα βακτήρια λαμβάνουν την ενέργειά τους από την οξείδωση ανόργανων αζωτούχων ενώσεων και αναπτύσσονται αργά (ο πολλαπλασιασμός γίνεται 40 φορές πιο αργά από ό, τι στα ετεροτροφικά βακτήρια), έτσι υπερνικούνται εύκολα από ετεροτροφικά βακτήρια, εάν η ποσότητα του οργανικού άνθρακα που υπάρχει κυρίως στα βιοστερεά που αιωρούνται στο νερό της καλλιέργειας, τους επιτρέψει να πολλαπλασιαστούν και συσσωρευτούν. Κατά τη λειτουργία ενός RAS, η καλή διαχείριση του συστήματος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ελαχιστοποίηση των αιωρούμενων στερεών μέσω κατάλληλων τεχνικών αφαίρεσης στερεών.

### 2.3.3 Βιοστερεά

Τα βιοστερεά στα RAS προέρχονται από τις ιχθυοτροφές, τα κόπρανα και τα βιοφίλμ (Ebeling et al., 2010) και είναι μία από τις πιο κρίσιμες και δύσκολες παραμέτρους όσον αφορά τον έλεγχο της ποιότητας του νερού. Δεδομένου ότι τα βιο-στερεά χρησιμεύουν ως υπόστρωμα για τα ετεροτροφικά βακτήρια, η αύξηση της συγκέντρωσής τους μπορεί τελικά να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση οξυγόνου, κακή απόδοση των βιοφίλτρων (Michaud et al., 2006), αυξημένη θολότητα του νερού ακόμη και μηχανική απόφραξη τμημάτων του συστήματος (Becke et al., 2017; Chen et al., 1994; Couturier et al., 2009).

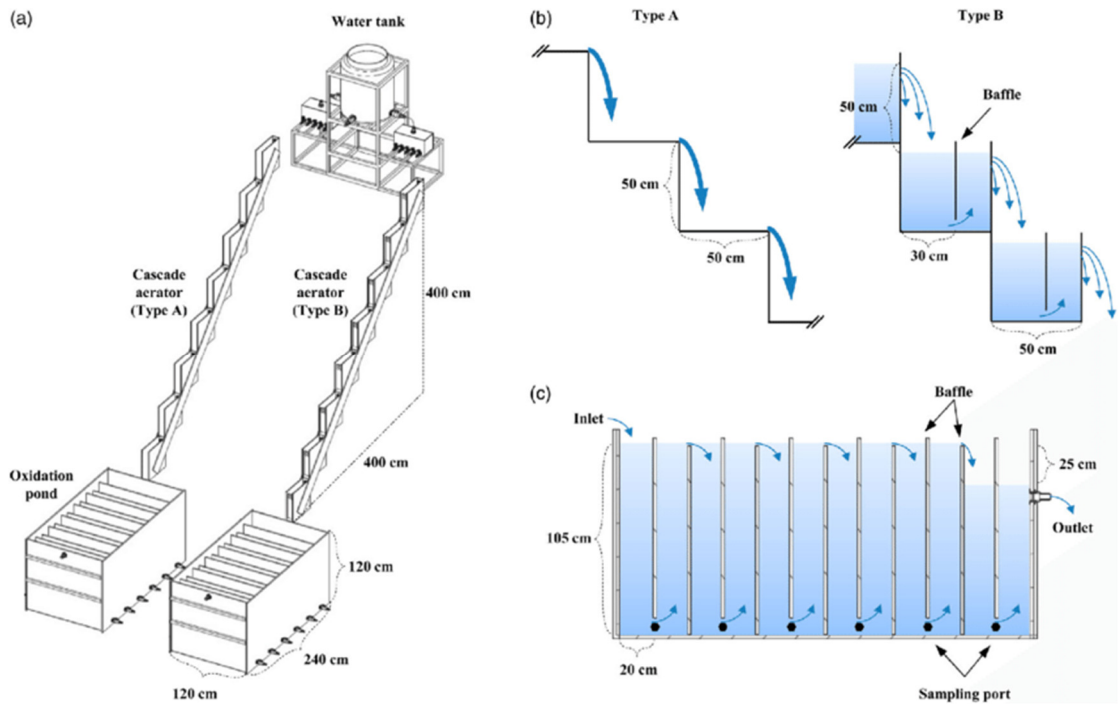
Στα RAS, τα βιοστερεά ταξινομούνται γενικά τόσο από το μέγεθός τους όσο και

από την ικανότητα απομάκρυνσής τους με ορισμένες τεχνικές. Από το συνολικό κλάσμα των στερεών που παράγονται σε ένα RAS, τα καθήμενα στερεά είναι αυτά που είναι γενικά μεγαλύτερα από 100  $\mu\text{m}$  και μπορούν να απομακρυνθούν με διαχωρισμό βαρύτητας. Αιωρούμενα στερεά, με μεγέθη που κυμαίνονται από 100  $\mu\text{m}$  έως 30  $\mu\text{m}$ , είναι εκείνα που δεν κατακάθονται, αλλά μπορούν να αφαιρεθούν με μηχανικά μέσα (δηλαδή κοσκίνισμα). Λεπτά στερεά, με μεγέθη μικρότερα από 30  $\mu\text{m}$ , είναι γενικά εκείνα που δεν μπορούν να αφαιρεθούν με κοσκίνισμα και πρέπει να ελέγχονται με άλλα μέσα όπως φυσικοχημικές διεργασίες, διεργασίες φιλτραρίσματος μεμβράνης, αραίωση ή βιοκαθαρισμό (Chen et al., 1994; Ebeling et al., 2010; Summerfelt, 2003). Οι τεχνικές για τον έλεγχο των καθήμενων και εναιωρημένων στερεών είναι πολύ γνωστές και ανεπτυγμένες, και υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία πάνω στο θέμα. Για παράδειγμα, η χρήση δεξαμενών διπλής αποστράγγισης, διαχωριστών στροβιλισμού, διαχωριστών ακτινικής ροής και λεκανών καθίζησης είναι μερικά δημοφιλή μέσα για τον έλεγχο των καθήμενων στερεών (Couturier et al., 2009; Ebeling et al., 2010; Summerfelt, 2003). Τα φίλτρα μικρο-διήθησης είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος ελέγχου αιωρούμενων στερεών (Dolan et al., 2013; Fernandes et al., 2015) και χρησιμοποιούνται συχνά στη βιομηχανία για τον έλεγχο τόσο των καθήμενων όσο και των αιωρούμενων στερεών με μία μόνο τεχνική. Άλλες δημοφιλείς συσκευές σύλληψης στερεών είναι τα φίλτρα βάθους, όπως τα φίλτρα σφαιριδίων (Cripps and Bergheim, 2000) και τα φίλτρα ταχείας άμμου, τα οποία είναι επίσης δημοφιλή σε πισίνες. Επιπλέον, οι οδηγίες σχεδιασμού για την αποτροπή της συσσώρευσης στερεών σε δεξαμενές, σωληνώσεις και άλλα μέρη του συστήματος είναι επίσης διαθέσιμες στη βιβλιογραφία (Davidson and Summerfelt, 2004; Lekang, 2013). Τέλος, τα λεπτά στερεά στα RAS αντιμετωπίζονται συνήθως με οζονισμό, βιοκαθαρισμό, κλασμάτωση αφρού ή συνδυασμό αυτών των τεχνικών. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των RAS επικεντρώθηκε στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου ελέγχου του κλάσματος των λεπτών στερεών και στην κατανόηση της επίδρασής του στην καλή διαβίωση των ψαριών και στην απόδοση του συστήματος.

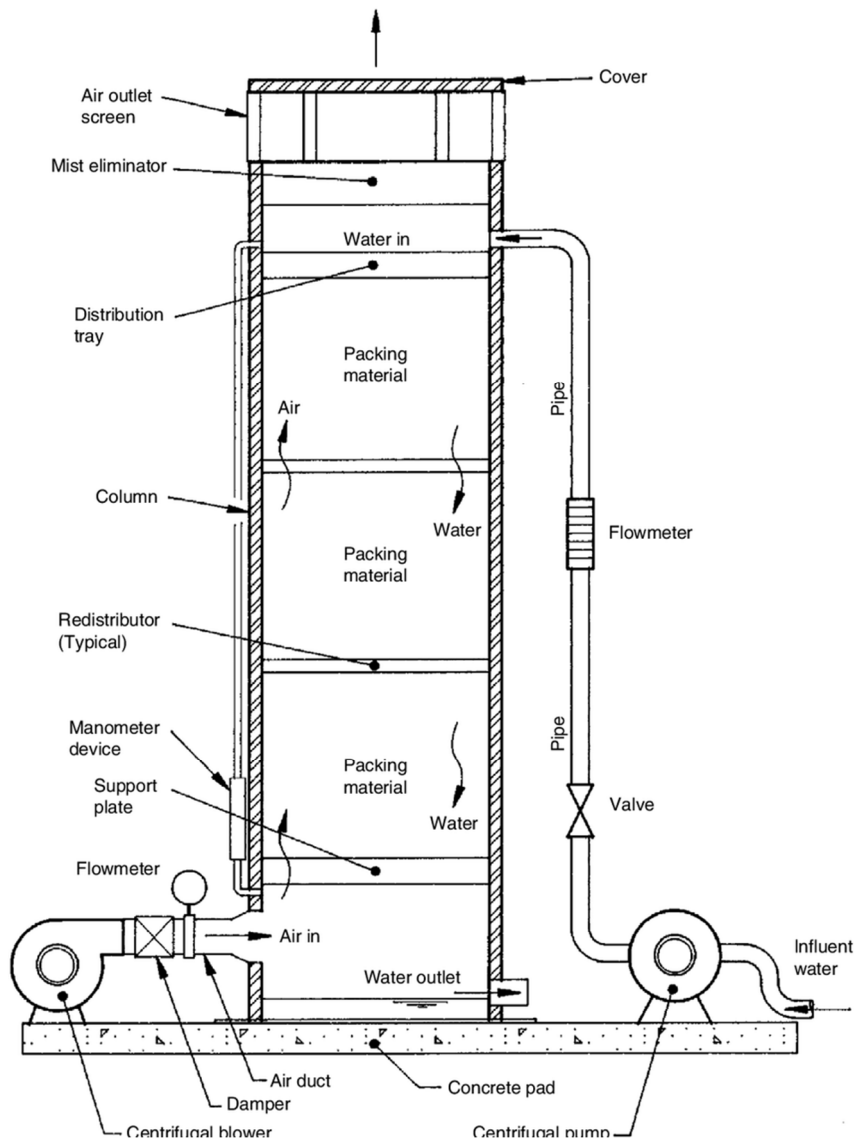
#### 2.3.4 Διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>

Εκτός του οξυγόνου, και άλλα αέρια που διαλύονται στο νερό εκτροφής μπορούν να επηρεάσουν την καλή διαβίωση των ψαριών εάν δεν ελέγχονται. Υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στο νερό αναστέλλουν τη διάχυση του CO<sub>2</sub> από το αίμα των ψαριών. Στα ψάρια, το αυξημένο CO<sub>2</sub> στο αίμα μειώνει το pH του αίματος και με τη σειρά του, τη σύνδεση της αιμοσφαιρίνης με το οξυγόνο (Noga, 2010). Υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> έχουν επίσης συσχετιστεί με νεφροκακίνωση, συστηματικά κοκκώματα και εναποθέσεις ασβεστίου στα όργανα στα σαλμονοειδή (Noga, 2010). Το CO<sub>2</sub> στα RAS προέρχεται ως προϊόν αναπνοής από ψάρια και βακτήρια. Ως εξαιρετικά διαλυτό αέριο, το διοξείδιο του άνθρακα δεν φτάνει σε ισορροπία τόσο εύκολα όσο το οξυγόνο ή το άζωτο και, ως εκ τούτου, πρέπει να έρθει σε επαφή με υψηλούς όγκους αέρα με χαμηλή συγκέντρωση σε CO<sub>2</sub> για να εξασφαλιστεί η μεταφορά του εκτός νερού (Summerfelt, 2003). Κατά γενικό κανόνα, στα RAS που παρέχεται καθαρό οξυγόνο θα απαιτηθεί κάποια μορφή αφαίρεσης διοξειδίου του άνθρακα, ενώ στα RAS που παρέχεται οξυγόνο με αερισμό δεν απαιτείται ενεργή αφαίρεση CO<sub>2</sub> (Eshchar et al., 2003).

Θεωρητικά, οποιαδήποτε συσκευή μεταφοράς / αερισμού ανοιχτή στην ατμόσφαιρα θα προσφέρει κάποια μορφή αφαίρεσης CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, οι εξειδικευμένες συσκευές αφαίρεσης διοξειδίου του άνθρακα απαιτούν την επαφή μεγάλων όγκων αέρα με το νερό επεξεργασίας. Οι συσκευές αφαίρεσης CO<sub>2</sub> έχουν ως επί το πλείστον επικεντρωθεί σε συσκευές τύπου καταρράκτη, όπως αεριστές τύπου καταρράκτη (Εικόνα 2.7), βιολογικά φίλτρα και, το πιο σημαντικό, αεριστή με στήλη (Summerfelt, 2003) (Εικόνα 2.8), ο οποίος έχει γίνει τυπικό κομμάτι εξοπλισμού σε εμπορικές RAS εφαρμογές και λειτουργεί με καθαρό οξυγόνο. Παρόλο που η ανάπτυξη της τεχνολογίας αερισμού στηλών έχει προχωρήσει τα τελευταία χρόνια, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που πραγματοποιήθηκε πάνω σε αυτήν τη συσκευή επικεντρώθηκε στην κατανόηση της απόδοσής της υπό διαφορετικές συνθήκες (π.χ. γλυκού νερού έναντι θαλασσινού νερού) και παραλλαγών σχεδιασμού όπως ύψη, και ρυθμοί αερισμού.



Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση αεριστή τύπου καταρράκτη. (Πηγή: Oh et al., 2016)



Εικόνα 2.8: Σχηματική απεικόνιση αεριστή με στήλη. (Πηγή: Mohammed Evuti et al., 2014)

### 2.3.5 Συνολική πίεση αερίων

Ως συνολική πίεση αερίων (TGP) ορίζεται το άθροισμα των μερικών πιέσεων όλων των αερίων που διαλύονται σε ένα υδατικό διάλυμα. Όσο λιγότερο διαλυτό είναι ένα αέριο, τόσο περισσότερο χώρο καταλαμβάνει στο υδατικό διάλυμα και έτσι, τόσο μεγαλύτερη πίεση ασκεί σε αυτό. Από τα κύρια ατμοσφαιρικά αέρια (άζωτο, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα) το άζωτο είναι το λιγότερο διαλυτό (π.χ. 2,3 φορές λιγότερο διαλυτό από το οξυγόνο και περισσότερο από 90 φορές λιγότερο διαλυτό από το διοξείδιο του άνθρακα). Έτσι, το άζωτο συμβάλλει στη TGP περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο αέριο, αλλά δεν καταναλώνεται από τα ψάρια ή τα ετεροτροφικά βακτήρια, επομένως συσσωρεύεται στο νερό, εκτός εάν

αφαιρεθεί. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το οξυγόνο συμβάλει επίσης στην υψηλή TGP εάν δεν αφαιρεθούν οι υπερβολικές συγκεντρώσεις του από το διάλυμα. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι οι λίμνες με φωτο-αυτοτροφική δραστηριότητα σε αυτές. Οι φωτο-αυτοτροφικοί οργανισμοί (συνήθως φυτικοί οργανισμοί που εκτελούν φωτοσύνθεση) απελευθερώνουν οξυγόνο στο νερό, και μια ήσυχη επιφάνεια νερού μπορεί να μην παρέχει αρκετή ανταλλαγή αερίων ώστε η περίσσεια αερίων να διαφύγει στην ατμόσφαιρα και έτσι, μπορεί να συμβεί υπερκορεσμός. Τα ψάρια απαιτούν συνολική πίεση αερίων ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Εάν τα ψάρια αναπνέουν νερό με υψηλή συνολική πίεση αερίων, το υπερβολικό αέριο (γενικά άζωτο) εξέρχεται από την κυκλοφορία του αίματος και σχηματίζει φυσαλίδες, με συχνά σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία για τα ψάρια (Noga, 2010). Στην ενυδρείοποιία αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως ασθένεια φυσαλίδων αερίου (gas bubble disease).

### **2.3.6 Νιτρικά**

Τα νιτρικά ( $\text{NO}_3$ ) είναι το τελικό προϊόν της νιτροποίησης και συνήθως η τελευταία παράμετρος που ελέγχεται στο RAS, λόγω της σχετικά χαμηλής τοξικότητάς της (van Rijn et al., 2006). Αυτό οφείλεται κυρίως στη χαμηλή διαπερατότητά τους στη μεμβράνη των ψαριών (Camargo and Alonso, 2006). Η τοξική δράση των νιτρικών είναι παρόμοια με εκείνη του  $\text{NO}_2^-$ , επηρεάζοντας την ικανότητα των κυττάρων που μεταφέρουν οξυγόνο. Ο έλεγχος των συγκεντρώσεων νιτρικών στα RAS έχει παραδοσιακά επιτευχθεί με αραίωση. Ωστόσο, ο βιολογικός έλεγχος των νιτρικών χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες απονιτροποίησης είναι ένας αναπτυσσόμενος τομέας έρευνας και ανάπτυξης στα RAS. Η ανοχή στα νιτρικά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τα υδρόβια είδη και το στάδιο ζωής, με την αλατότητα να έχει βελτιωτική επίδραση στην τοξικότητά του. Είναι σημαντικό για τους χειριστές RAS να κατανοήσουν τις χρόνιες επιδράσεις της έκθεσης σε νιτρικά άλατα παρά τις άμεσες οξείες επιπτώσεις, καθώς οι οξείες συγκεντρώσεις πιθανότατα δεν θα επιτευχθούν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ενός RAS.

### **2.3.7 Αλκαλικότητα**

Η αλκαλικότητα ορίζεται, σε γενικές γραμμές, ως η ρυθμιστική ικανότητα του

pH του νερού (Ebeling et al., 2010). Ο έλεγχος της αλκαλικότητας στα RAS είναι σημαντικός καθώς η νιτροποίηση είναι μια διαδικασία σχηματισμού οξέος που την καταστρέφει. Επιπλέον, τα βακτηρίδια νιτροποίησης απαιτούν σταθερές τιμές αλκαλικότητας. Η χαμηλή αλκαλικότητα σε ένα RAS θα έχει ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις του pH και δυσλειτουργία του βιολογικού φίλτρου νιτροποίησης (Colt and Watten, 1988; Summerfelt et al., 2009). Η προσθήκη αλκαλικότητας στο RAS θα προσδιοριστεί από τη δραστηριότητα νιτροποίησης, η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με την προσθήκη τροφής, από την υπάρχουσα αλκαλικότητα του νερού και του νερού πηγής.



### 3. Ενυδραιοπονία

#### 3.1 Εισαγωγή

Η ενυδραιοπονία είναι μια τεχνολογία μιας ευρύτερης γεωργικής προσέγγισης γνωστής ως ολοκληρωμένα συστήματα γεωργικής υδατοκαλλιέργειας (integrated agri-aquaculture systems, IAAS) (Gooley and Gavine, 2003) και χαρακτηρίζεται γενικά σαν ένα σύστημα ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (integrated multi-trophic aquaculture, IMTA) γλυκού νερού στην ξηρά που συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια παραγωγής ψαριών (π.χ. ψάρια, καραβίδες, μαλάκια κ.λπ.) με την υδροπονική παραγωγή υδρόβιων φυτών (π.χ. λαχανικά, βότανα, φρούτα, φαρμακευτικά φυτά κ.λπ.). Η αρχή αυτής της τεχνολογίας συνίσταται στην ενσωμάτωση πρακτικών υδατοκαλλιέργειας διαφόρων μορφών (κυρίως ιχθυοκαλλιέργειας) στη γεωργική φυτική παραγωγή. Η λογική των ολοκληρωμένων συστημάτων γεωργικής υδατοκαλλιέργειας είναι από τους πόρους της υδατοκαλλιέργειας και της φυτικής παραγωγής, όπως το νερό και τα θρεπτικά συστατικά, να επωφεληθούν και τα δύο συνεργαζόμενα μέρη, για την ανάπτυξη και επίτευξη οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμων πρακτικών πρωτογενούς παραγωγής (Gooley and Gavine, 2003). Στην ουσία, τόσο τα επίγεια αγροτικά συστήματα παραγωγής φυτών όσο και τα υδρόβια ζώα μοιράζονται έναν κοινό πόρο που δεν είναι άλλος από το νερό. Τα φυτά γενικά καταναλώνουν νερό μέσω διαπνοής και το απελευθερώνουν στο περιβάλλον ως υδρατμούς, ενώ τα ψάρια γενικά καταναλώνουν λιγότερο νερό, αλλά η ελεγχόμενη καλλιέργειά τους παράγει σημαντικές ποσότητες λυμάτων λόγω μεταβολικών αποβλήτων. Ως εκ τούτου, η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να ενσωματωθεί στην τροφοδοσία νερού της φυτικής παραγωγής, έτσι ώστε δύο καλλιέργειες (ψάρια και φυτά) να μπορούν να παραχθούν από μια πηγή νερού που θα χρησιμοποιούνταν γενικά για την παραγωγή μιας καλλιέργειας (φυτά).

Ένα ενδιαφέρον πρόσθετο πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης της υδατοκαλλιέργειας στην τροφοδοσία άρδευσης της φυτικής παραγωγής είναι ότι η υδατοκαλλιέργεια παράγει επίσης θρεπτικά συστατικά μέσω των διαλυμένων και αδιάλυτων αποβλήτων που παράγονται από τον μεταβολισμό των ψαριών καθώς και άλλων υδρόβιων ζώων. Τα απόβλητα που παράγονται από τα ψάρια παρέχουν τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ τα φυτά

απομακρύνουν τοξικές ενώσεις (π.χ. νιτρικά και φωσφόρος) που προκύπτουν από την απέκκριση των ψαριών (Barak et al., 1996; Love et al., 2015, 2014). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα υδρόβια συστήματα είναι κλειστά, συστήματα ανακυκλοφορίας, τα οποία επιτρέπουν τη διατήρηση θρεπτικών συστατικών σε συγκεντρώσεις επαρκείς για την παραγωγή υδροπονικών φυτών (Bohl, 1977; Seawright et al., 1998).

Ως εκ τούτου, η υδατοκαλλιέργεια μπορεί επίσης να παράγει μια ροή θρεπτικών συστατικών που είναι κατάλληλα και βοηθούν την παραγωγή φυτών ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά συστατικά. Τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης υδατοκαλλιέργειας σε συμβατικά συστήματα παραγωγής φυτών συνοψίστηκαν από τους (Gooley and Gavine, 2003) ως:

1. Αύξηση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας των γεωργικών εκμεταλλεύσεων χωρίς αύξηση της κατανάλωσης νερού.
2. Μετάβαση αγροκτημάτων σε καλλιέργειες υψηλότερης αξίας, συμπεριλαμβανομένων υδρόβιων ειδών υψηλής αξίας.
3. Επαναχρησιμοποίηση πόρων που αλλιώς θα σπαταλιούνταν στο αγρόκτημα (π.χ. δέσμευση και επαναχρησιμοποίηση θρεπτικών ουσιών και νερού).
4. Μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ημι-εντατικών και εντατικών γεωργικών πρακτικών, μέσω της μείωσης της μόλυνσης του περιβάλλοντος λόγω απόρριψης αποβλήτων.
5. Καθαρά οικονομικά οφέλη ενισχύοντας τα υπάρχοντα αγροτικά κεφάλαια και μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα.

Φημολογείται ότι η ενυδραιοπονία εξελίχθηκε από τις αρχαίες γεωργικές πρακτικές ενσωμάτωσης ιχθυοκαλλιέργειας με την παραγωγή φυτών, ειδικά στην Νοτιοανατολική Ασία, στις πλημμυρισμένες καλλιέργειες ρυζιού (Εικόνα 3.2) και τη Νότια Αμερική στην κοιλάδα του Μεξικού όπου με την τεχνική Chinampa (Εικόνα 3.1), όπου πλωτές εξέδρες πάνω σε λίμνες χρησιμοποιούνταν για την καλλιέργεια φυτών (Komives and Junge, 2015). Στην πραγματικότητα, ιστορικά, τα ψάρια σπάνια προσθέτονταν ενεργά στους ορυζώνες μέχρι τον 19ο αιώνα (Halwart and Gurta, 2004) και ήταν σε πολύ μικρές πυκνότητες, ανίκανες να

παρέχουν ουσιαστική θρεπτική βοήθεια στα φυτά. Τα Chinampas χτίζονταν παραδοσιακά σε λίμνες στο Μεξικό όπου τα πλεονεκτήματα των θρεπτικών συστατικών μπορεί να έχουν παρασχεθεί μέσω των ευτροφικών ή ημι-ευτροφικών ιζημάτων της λίμνης παρά απευθείας από οποιοδήποτε σχεδιασμένο ή ενεργά ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ψαριών (Baquedano, 2000; Morehart, 2016).



Εικόνα 3.1: Α) Γραφική απεικόνιση των Chinampas των Αζτέκων Β) Σημερινή αξιοποίησή τους. (Πηγή: Α) <http://livingpermaculture.blogspot.com> Β) [wikicommons.org](https://commons.wikimedia.org))



Εικόνα 3.2: Σημερινή συγκαλλιέργεια ψαριών και φυτών σε ορυζώνες της Ινδίας. (Πηγή: <https://krishijagran.com>)

Τα σύγχρονα συστήματα ενυδρειοπονίας ξεκίνησαν στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 1970 και συν-εξελίχθηκαν από διάφορα ιδρύματα με ενδιαφέρον για πιο

βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Πρώιμη σημαντική εργασία πραγματοποιήθηκε από αρκετούς ερευνητές, αλλά τελικά, ο πρόγονος σχεδόν όλων των σύγχρονων ενυδρειοπονικών συστημάτων θεωρείται το έργο που εκτελέστηκε από τον James Rakocy και την ομάδα του στο Πανεπιστήμιο των Παρθένων Νήσων (University of the Virgin Islands, UVI) ξεκινώντας στις αρχές της δεκαετίας του 1980 (Lennard, 2017). Η ενυδρειοπονία θεωρείται τώρα μια νέα και αναδυόμενη βιομηχανία με μικρή σχετικά θέση στο ευρύτερο, παγκόσμιο πλαίσιο γεωργικής παραγωγής και υπάρχουν πολλές παραλλαγές της τεχνολογίας ενσωμάτωσης της ιχθυοκαλλιέργειας με την καλλιέργεια υδρόφιλων φυτών που ορίζονται συλλογικά κάτω από το σήμα ή το όνομα της ενυδρειοπονίας (Knaus and Palm, 2017). Ως εκ τούτου, η ενυδρειοπονία επιδιώκει να ενσωματώσει την παραγωγή ζώων υδατοκαλλιέργειας με υδροπονική παραγωγή φυτών χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους για να μοιραστούν νερό και θρεπτικά στοιχεία για την παραγωγή εμπορεύσιμων ψαριών και φυτικών προϊόντων.

### **3.2 Ορισμός ενυδρειοπονίας**

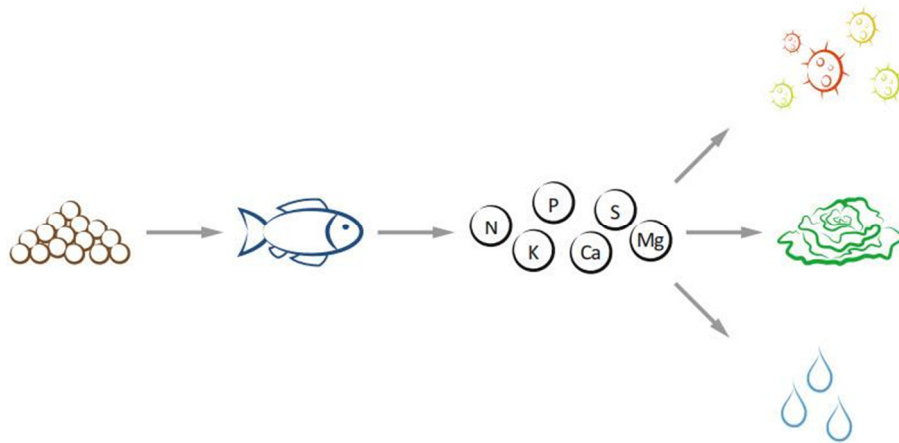
Η ενυδρειοπονία εντάσσεται στον ευρύτερο ορισμό των Ολοκληρωμένων Συστημάτων Γεωργικής Υδατοκαλλιέργειας (IAAS). Ωστόσο, το IAAS εφαρμόζει πολλές διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής υδρόβιων ζώων και φυτών, ενώ η ενυδρειοπονία συνδέεται πολύ πιο στενά με την ενσωμάτωση τεχνολογιών καλλιέργειας ψαριών με βάση τις δεξαμενές (π.χ. συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία, RAS) και με τεχνολογίες υδροπονικής φυτικής καλλιέργειας (Lennard, 2017). Οι τεχνολογίες RAS εφαρμόζουν συγκεκριμένες και τυπικές μεθόδους για την καλλιέργεια ψαριών σε δεξαμενές εφαρμόζοντας φιλτράρισμα για έλεγχο και αλλαγή της χημείας του νερού ώστε να είναι κατάλληλη για ψάρια (π.χ. γρήγορη και αποτελεσματική απομάκρυνση αποβλήτων στερεών ψαριών, αποτελεσματική μετατροπή δυνητικά τοξικών αμμωνιακών ενώσεων σε λιγότερο τοξικά νιτρικά και συντήρηση οξυγόνου μέσω υποβοηθούμενου αερισμού ή απευθείας εισαγωγής αερίου οξυγόνου) (Ebeling et al., 2010). Οι τεχνολογίες υδροπονίας και καλλιέργειας σε υπόστρωμα εφαρμόζουν τυπικές μεθόδους για την καλλιέργεια βρώσιμων χερσαίων φυτών σε υδάτινα περιβάλλοντα (δηλαδή τα φυτά αποκτούν πρόσβαση στα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την

ανάπτυξή τους μέσω μιας μεθόδου με βάση το νερό) (Resh, 2012).

Η συσχέτιση της υδατοπονίας με την τυποποιημένη υδατοκαλλιέργεια RAS και την υδροπονία ή την καλλιέργεια σε υπόστρωμα σημαίνει ότι η ενυδρειοπονία συχνά ορίζεται απλά ως:

«... ο συνδυασμός παραγωγής ψαριών (υδατοκαλλιέργεια) και υδροπονίας (καλλιέργειας χωρίς έδαφος) με την κυκλοφορία συνδεδεμένων ή αποσυνδεδεμένων υδάτων.» (Knaus and Palm, 2017).

Αυτός ο γενικός ορισμός δίνει έμφαση στην ενσωμάτωση υλικού, εξοπλισμού ή τεχνολογιών και δίνει ελάχιστη, αν όχι, έμφαση σε άλλες πτυχές της μεθόδου.



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ροής θρεπτικών σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας. Η τροφή των ψαριών μετατρέπεται σε απόβλητα που διανέμονται σε μικροοργανισμούς, φυτά και υδάτινο περιβάλλον. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

Επειδή η ενυδρειοπονία είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία βιομηχανικής κλίμακας που εφαρμόζει διαφορετικές μεθόδους και προσεγγίσεις, ο προηγούμενος ορισμός είναι πολύ ευρύς. Μερικοί ορίζουν την ενυδρειοπονία λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο το περιβάλλον της ανακυκλοφορίας νερού (Cerozi and Fitzsimmons, 2017), κάποιος επικεντρώνονται σε προσεγγίσεις που δεν επιστρέφουν το νερό από τα φυτά στα ψάρια (Delaidé et al., 2016) και άλλοι περιλαμβάνουν μεθόδους ανακυκλοφορίας και αποσύνδεσης (Knaus and Palm, 2017). Ακόμα περισσότερο, ορισμένοι ερευνητές συμπεριλαμβάνουν τη χρήση λυμάτων υδατοκαλλιέργειας σε υδροπονικά συστήματα με τον τίτλο

ενυδρειοπονία (Palm et al., 2018). Ιστορικά, η ενυδρειοπονία, όπως υποδηλώνει η ανάλυση της λέξης (ενυδρείο και υδροπονία), ορίστηκε ως η υδατοκαλλιέργεια (ενυδρείο) σε συνδιασμό με την παραγωγή υδροπονικών φυτών (Rakocy, 1993), οπότε οι τρέχουσες προσπάθειες για συσχέτισή της με την εδαφολογική κουλτούρα φαίνονται ασύλληπτες.

Ενώ τα συστήματα ενυδρειοπονίας ενσωματώνουν τεχνολογίες υδατοκαλλιέργειας με βάση δεξαμενές, σε συνδιασμό με τεχνολογίες υδροπονικής φυτικής καλλιέργειας, τα συστήματα ενυδρειοπονίας λειτουργούν προμηθεύοντας θρεπτικά συστατικά μεταξύ των παραγωγικών ατόμων (ψάρια και φυτά) και των ατόμων που παρέχουν βιολογικές και χημικές υπηρεσίες που βοηθούν την παραγωγή (μικροχλωρίδα) (Εικόνα 3.3) (Lennard, 2017). Επομένως, η ενυδρειοπονία είναι περισσότερο ένα σύστημα που σχετίζεται με την τροφοδοσία θρεπτικών συστατικών, τη δυναμική και τον διαχωρισμό παρά ένα σύστημα που σχετίζεται με την τεχνολογία, τον εξοπλισμό ή το υλικό που εφαρμόζεται.

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο ορισμός της ενυδρειοπονίας περιλαμβάνει ένα παρόμοιο ορισμό, με λεπτές παραλλαγές. Ο ευρύτερος ορισμός παρέχεται γενικά στις επιστημονικές δημοσιεύσεις του Rakocy και της ομάδας του στο UVI, για παράδειγμα:

«Η ενυδρειοπονία είναι η συνδυασμένη καλλιέργεια ψαριών και φυτών σε κλειστά συστήματα ανακυκλοφορίας.» (J. Rakocy et al., 2004a, b).

Αυτός ο πρώτος ορισμός βασίστηκε στην υπόθεση ότι τα συστήματα επανακυκλοφορίας ενός βρόχου, αποτελούμενα από ένα τμήμα ανακυκλοφορίας της υδατοκαλλιέργειας και ένα τμήμα υδροπονικό, αντιπροσώπευαν όλα τα υδρονικά συστήματα, τα οποία υπήρχαν τότε. Οι Graber & Junge (2009) επέκτειναν τον ορισμό, λόγω αλλαγών και εξελίξεων στην προσέγγιση, ως εξής:

«Η ενυδρειοπονία είναι μια ειδική μορφή συστημάτων υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία (RAS), δηλαδή μιας πολυκαλλιέργειας που αποτελείται από δεξαμενές ψαριών (υδατοκαλλιέργεια) και φυτά που καλλιεργούνται στον ίδιο

κύκλο νερού (υδροπονία).» (Graber and Junge, 2009).

Οι πρόσφατες εξελίξεις και μέθοδοι απαιτούν επανεξέταση αυτής της άποψης. Τα τελευταία χρόνια στην ενυδραιοπονία υπήρξε μετατόπιση της εστίασης σε ένα σύστημα παραγωγής που ενσωματώνει και αντιμετωπίζει τόσο την οικολογική ευθύνη όσο και την οικονομική βιωσιμότητα. Οι Kloas et al. (2015) και Suhl et al. (2016) ήταν από τους πρώτους που αντιμετώπισαν αυτό το οικονομικό ζήτημα και πρόσθεσαν στον ορισμό:

«[. . .] ένα μοναδικό και καινοτόμο σύστημα ενυδραιοπονίας διπλής ανακυκλοφορίας ως προϋπόθεση για υψηλή παραγωγικότητα συγκρίσιμη με τις επαγγελματικές αυτόνομες εγκαταστάσεις ψαριών / φυτών.» (Suhl et al., 2016)»

Το ζήτημα του ορισμού, ή η αποσαφήνιση «τι μπορεί να οριστεί ως ενυδραιοπονία», υπήρξε θέμα συζήτησης τα τελευταία χρόνια. Ένας από τους κύριους τομείς ανάπτυξης ήταν αυτός των ενυδραιοπονικών συστημάτων πολλαπλών βρόχων (ή αποσυνδεδεμένων) που στοχεύουν στην παροχή πρόσθετων λιπασμάτων στα φυτά (από τα ψάρια), προκειμένου να πετύχουν βέλτιστη συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών (Goddek, 2017). Δεν πρέπει να υπάρχει αντίθεση μεταξύ των ιδεολογιών της πλήρους ανακυκλοφορίας και των πολλαπλών βρόχων, και οι δύο έχουν τις αντίστοιχες χρήσεις και εφαρμογές τους στο κατάλληλο βιομηχανικό πλαίσιο και κοινή κινητήρια δύναμη και των δύο θα πρέπει να είναι η τεχνολογία, που θα είναι αποτελεσματική στην χρήση νερού και θρεπτικών, καθώς επίσης και οικονομικά ανταγωνιστική για να εδραιωθεί στην αγορά. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα COST που χρηματοδοτεί τον Κόμβο Ενυδραιοπονίας (COST FA1305, 2017) εφαρμόζει τον ορισμό:

«. . . ένα σύστημα παραγωγής υδρόβιων οργανισμών και φυτών όπου η πλειονότητα (> 50%) των θρεπτικών συστατικών που διατηρούν τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών προέρχεται από απόβλητα που προέρχονται από τη διατροφή των υδρόβιων οργανισμών», ο οποίος δίνει σαφώς έμφαση στην κατανομή των θρεπτικών ουσιών.»

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το ποσοστό των ψαριών προς τα φυτά πρέπει να παραμείνει σε κάποιο επίπεδο ώστε τα φυτά να καλλιεργούνται χρησιμοποιώντας απόβλητα ψαριών και εν συνεχεία να χαρακτηριστεί το σύστημα ενυδρειοπονικό. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που περιέχει ένα ψάρι και πολλά εκτάρια υδροπονικής φυτικής καλλιέργειας, δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως ενυδρειοπονικό, απλώς και μόνο επειδή ένα ψάρι δεν συμβάλλει ουσιαστικά στις θρεπτικές απαιτήσεις των φυτών. Το ίδιο συμβαίνει αν υπάρχουν πολλά ψάρια σε μια δεξαμενή και λίγα φυτά να τροφοδοτούνται. Δεδομένου ότι η επισήμανση των προϊόντων ως ενυδρειοπονικά παίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο στην επιλογή των καταναλωτών, θα πρέπει ο ορισμός να επαναπροσδιοριστεί με βάση τις πολλαπλές εξελίξεις της τεχνολογίας. Ο ορισμός πρέπει τουλάχιστον να αναφέρει ότι η πλειονότητα των θρεπτικών ουσιών που χρησιμοποιήθηκαν στα φυτά προέρχονται από την υδατοκαλλιέργεια.

Ένας νέος ορισμός μπορεί επομένως να είναι ο:

«Η ενυδρειοπονία ορίζεται ως μια ολοκληρωμένη πολυτροφική προσέγγιση παραγωγής τροφίμων σε νερό που περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα σύστημα υδατοκαλλιέργειας ανακυκλοφορίας (RAS) και μια συνδεδεμένη υδροπονική μονάδα, όπου το νερό για καλλιέργεια μοιράζεται με κάποια διαμόρφωση μεταξύ των δύο μονάδων. Τουλάχιστον το 50% των θρεπτικών συστατικών που παρέχονται στα φυτά πρέπει να προέρχονται από απορρίμματα ψαριών.»

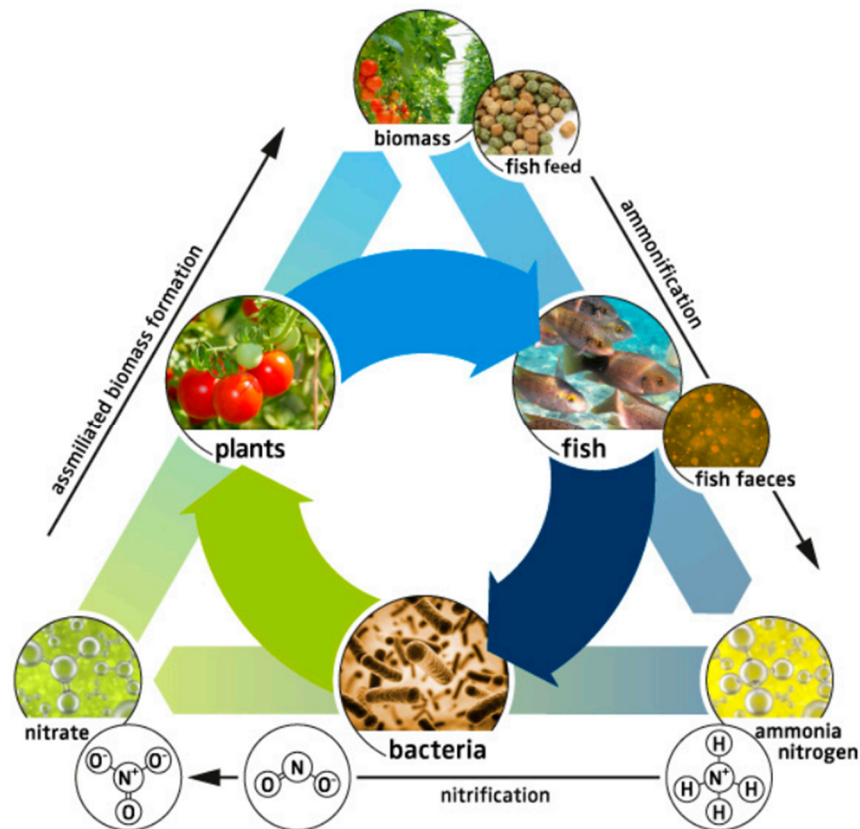
Οι ορισμοί που βασίζονται σε θρεπτικά συστατικά είναι ανοιχτοί και δεν κρίνουν την επιλογή εφαρμοσμένης τεχνολογίας ή ακόμα και τις αναλογίες κάθε συστατικού (ψάρια και φυτά), εφόσον χρησιμοποιείται υδατοκαλλιέργεια και κάποιας μορφής υδατικής καλλιέργειας φυτών (υδροπονικής ή με υπόστρωμα). Εστιάζουν στη δυναμική των θρεπτικών συστατικών και στην κατανομή των θρεπτικών ουσιών των εφαρμοζόμενων μεθόδων και, ως εκ τούτου, διασφαλίζει, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό, ότι τα πλεονεκτήματα που συνδέονται συχνά με την ενυδρειοπονία (εξοικονόμηση νερού, απόδοση θρεπτικών συστατικών,



μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, βιωσιμότητα).

### **3.3 Αρχές της ενυδραιοπονίας**

Η ενυδραιοπονία συνδυάζει στοιχεία υδροπονίας και ανακυκλοφορίας θρεπτικών στοιχείων υδατοκαλλιέργειας. Η συμβατική υδροπονία απαιτεί ορυκτά λιπάσματα για να τροφοδοτήσει τα φυτά με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, αλλά τα συστήματα ενυδραιοπονίας χρησιμοποιούν το διαθέσιμο νερό της υδατοκαλλιέργειας που είναι πλούσιο σε απόβλητα ψαριών ως θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του συνδυασμού έγκειται στο γεγονός ότι η περίσσεια θρεπτικών ουσιών δεν χρειάζεται να απομακρυνθεί μέσω περιοδικής ανταλλαγής χρησιμοποιημένου νερού υδατοκαλλιέργειας με γλυκό νερό όπως εφαρμόζεται στα κλασικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Το σύστημα προωθεί τη συμβίωση μεταξύ ψαριών, μικροοργανισμών και φυτών και ενθαρρύνει την αειφόρο χρήση νερού και θρεπτικών συστατικών, μέσω της ανακύκλωσής τους (Εικόνα 3.4). Μέσα σε αυτήν τη συνεργατική αλληλεπίδραση, οι αντίστοιχες οικολογικές αδυναμίες της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας μετατρέπονται σε πλεονεκτήματα. Αυτός ο συνδυασμός ελαχιστοποιεί ουσιαστικά την ανάγκη εισαγωγής θρεπτικών συστατικών και παραγωγής απορριμμάτων, σε αντίθεση με τη λειτουργία τους ως ξεχωριστά συστήματα.



Εικόνα 3.4: Κύκλος μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων σε ενυδρειοπονικό σύστημα κλειστού βρόγχου (Πηγή: Goddek, 2017)

Τα φυτά χρειάζονται διάφορα στοιχεία για την ομαλή ανάπτυξή τους όπως C, H, O, N, P, K, Ca, S και Mg που ονομάζονται και μακροθρεπτικά στοιχεία και αλλά και Fe, Cl, Mn, B, Zn, Cu και Mo, που ονομάζονται μικροθρεπτικά. Τα υδροπονικά διαλύματα περιέχουν καλά καθορισμένες αναλογίες αυτών των στοιχείων (Resh, 2012) και προστίθενται στο υδροπονικό διάλυμα σε ιοντική μορφή, με εξαίρεση τα στοιχεία C, H και O, τα οποία διατίθενται από τον αέρα και το νερό. Στα συστήματα ενυδρειοπονίας, η είσοδος φυτικών θρεπτικών συστατικών από τις δεξαμενές ψαριών περιέχει διαλυμένα απορρίμματα ψαριών πλούσια σε θρεπτικά συστατικά (απέκκριση βράγχιων, ούρα και κόπρανα), που περιέχουν τόσο διαλυτές όσο και στερεές οργανικές ενώσεις που διαλυτοποιούνται σε ιοντική μορφή στο νερό και αφομοιώνονται από τα φυτά. Για να διατηρηθεί η επαρκής ανάπτυξη των φυτών, πρέπει οι συγκεντρώσεις συστατικών να είναι υπό συνεχή έλεγχο. Περιοδικά μπορεί να χρειαστεί να προστεθούν θρεπτικά συστατικά για να ρυθμιστεί η συγκέντρωσή τους, όπως για παράδειγμα ο Fe όπου συχνά απουσιάζει στα απορρίμματα ψαριών

(J. E. Rakocy et al., 2004; Seawright et al., 1998).

Τα συστήματα ενυδρειοπονίας πρέπει να μπορούν να φιλοξενούν διαφορετικές κοινότητες μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην επεξεργασία και τη διαλυτοποίηση των απορριμμάτων ψαριών. Η αμμωνία ( $\text{NH}_4^+$ ) από τα ούρα των ψαριών και η απέκκριση των βράγχων μπορεί να αυξήσει τα τοξικά επίπεδα εάν δεν αφαιρεθεί από το σύστημα. Αυτό μπορεί να γίνει με βαθμιαία μικροβιακή μετατροπή σε νιτρικά. Ένας από τους πιο σημαντικούς μικροβιακούς μετατροπείς είναι τα αυτοτροφικά νιτροποιητικά βακτήρια που εγκαθίστανται ως βιοφίλμ σε στερεές επιφάνειες μέσα στο σύστημα όπως π.χ. το νιτροζο-βακτήριο *Nitrosomonas* sp. αλλά και τα νιτρο-βακτήρια όπως τα *Nitrospira* sp. και *Nitrobacter* sp. Η αμμωνία μέσα στο σύστημα μετατρέπεται σε νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) ιόντα από τα νιτροζο-βακτηρίδια, προτού μετατραπεί σε νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ) από τα νιτρο-βακτήρια (Tyson et al., 2008). Το τελικό προϊόν αυτής της βακτηριακής μετατροπής, τα νιτρικά άλατα, είναι σημαντικά λιγότερο τοξικά για τα ψάρια και, λόγω της βιομετατροπής του, είναι η κύρια πηγή αζώτου για την ανάπτυξη των φυτών σε συστήματα υδατοπονίας (Endut et al., 2014; Graber and Junge, 2009; J. E. Rakocy et al., 2004). Στα περισσότερα συστήματα, απαιτείται ειδική μονάδα βιοδιήθησης όπου απαιτείται εντατική νιτροποίηση.

Η βέλτιστη αναλογία μεταξύ ψαριών και φυτών πρέπει να προσδιοριστεί για να επιτευχθεί η σωστή ισορροπία μεταξύ της παραγωγής θρεπτικών συστατικών από τα ψάρια και της πρόσληψης από τα φυτά σε κάθε σύστημα. Ο Rakocy (2007) αναφέρει ότι αυτό θα μπορούσε να βασίζεται στην αναλογία ποσοστού απορρόφησης, που είναι η ποσότητα τροφής ανά ημέρα ανά τετραγωνικό μέτρο φυτών. Σε αυτή τη βάση, έχει προταθεί μια τιμή μεταξύ 60 και 100 g ημέρα<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> για φυλλώδη πράσινα λαχανικά που αναπτύσσονται σε πλοτά υδροπονικά συστήματα (Rakocy, 2012). Οι Endut et al., (2014) βρήκαν μια βέλτιστη αναλογία 15-42 gr ιχθυοτροφών ημέρα<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> για να θρέψουν τα φυτών που αναπτύσσονται στο ίδιο σύστημα με ένα αφρικανικό γατόψαρο (*Clarias gariepinus*). Ως εκ τούτου, η εξεύρεση της σωστής ισορροπίας απαιτεί βασικές γνώσεις και εμπειρία σχετικά με τα ακόλουθα κριτήρια: (1) είδη ψαριών και το ποσοστό χρήσης της τροφής τους, (2) σύνθεση της τροφής των ψαριών, για παράδειγμα, η ποσότητα καθαρών πρωτεϊνών που μετατρέπονται σε Ολικό Αμμωνιακό Άζωτο (TAN), (3) συχνότητα σίτισης, (4) τύπος και σχεδιασμός υδροπονικού συστήματος, (5) τύποι και στάδια ανάπτυξης των καλλιεργημένων

φυτών (π.χ. φυλλώδη λαχανικά ή καρποφόρα λαχανικά), (6) πυκνότητα σποράς φυτών και (7) χημική σύνθεση του νερού που επηρεάζεται από το ρυθμό ανοργανοποίησης των απορριμμάτων των ψαριών. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα ψάρια, οι μικροοργανισμοί και τα φυτά βρίσκονται στο ίδιο υδάτινο περιβάλλον, οι περιβαλλοντικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία, το pH και οι συγκεντρώσεις ανόργανων στοιχείων πρέπει να ρυθμιστούν σε σημείο όσο το δυνατόν πιο κοντά στις αντίστοιχες βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης.

### **3.4 Το νερό και η σημασία του**

Το νερό είναι το βασικό μέσο που χρησιμοποιείται στα συστήματα ενυδρείοπονίας επειδή μοιράζεται μεταξύ των δύο κύριων συστατικών του συστήματος, ψαριών και φυτών. Είναι ο κύριος φορέας των θρεπτικών συστατικών μέσα στο σύστημα και καθορίζει το χημικό περιβάλλον των ψαριών και των φυτών. Ως εκ τούτου, είναι ένα ζωτικό συστατικό που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το σύστημα. Σε ένα ενυδρείοπονικό σύστημα, η πηγή του νερού και η χημική, φυσική και βιολογική σύσταση αυτού επηρεάζει σημαντικά το σύστημα, διότι θέτει μια βάση για αυτά που απαιτείται να προστεθούν στο σύστημα από το διάφορες εισόδους του συστήματος. Αυτές οι εισοδοί, με τη σειρά τους, επηρεάζουν και θέτουν το περιβάλλον στο οποίο καλλιεργούνται ψάρια και φυτά. Για παράδειγμα, μερικές από τις σημαντικότερες εισροές όσον αφορά τα θρεπτικά συστατικά σε οποιοδήποτε ενυδρείοπονικό σύστημα περιλαμβάνουν, την τροφή των ψαριών, τα ρυθμιστικά διαλύματα που εφαρμόζονται για τον έλεγχο και τον καθορισμό της τιμής του pH και τυχόν εξωτερικές προσθήκες ή συμπληρώματα θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την κάλυψη των θρεπτικών αναγκών των ψαριών και των φυτών (Lennard, 2017).

Οι ιχθυοτροφές έχουν σχεδιαστεί να παρέχουν τα θρεπτικά στοιχεία που απαιτούνται για την ανάπτυξη και την υγεία των ψαριών και επομένως περιέχουν μείγματα θρεπτικών ουσιών και ποσότητες με κεντρικό στόχο να βοηθήσουν την ανάπτυξη και αύξηση των ψαριών (Ebeling et al., 2010; Rakocy, 2007). Τα φυτά, από την άλλη πλευρά, έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά από τα ψάρια και οι τροφές ψαριών σπάνια, πληρούν τις συνολικές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά των φυτών (Rakocy, 2007). Εξαιτίας αυτού, τα ενυδρείοπονικά συστήματα

που εκτρέφουν ψάρια και φυτά και που χρησιμοποιούν αποκλειστικά ζωοτροφές ψαριών μπορούν να παράγουν αποτελεσματικά ψάρια, αλλά αυτό δεν συμβαίνει για την παραγωγή φυτών. Ένα καλό ενυδρειοπονικό σύστημα πρέπει το τελικό του αποτέλεσμα να είναι η βέλτιστη παραγωγή ψαριών και φυτών και, ως εκ τούτου, απαιτείται κάποια μορφή πρόσθετων θρεπτικών για την κάλυψη της συνολικής απαίτησης θρεπτικών συστατικών των φυτών (Rakocy, 2007; Suhl et al., 2016).

Το καλύτερο παράδειγμα προσέγγισης ενυδρειοπονικού συστήματος ανακυκλοφορίας είναι το ενυδρειοπονικό σύστημα του UVI (Πανεπιστήμιο των Παρθένων Νήσων) που αναπτύχθηκε από τον Δρ. James Rakocy και την ομάδα του (Rakocy, 2007). Ο σχεδιασμός του UVI προσθέτει θρεπτικά συστατικά τόσο για τα ψάρια όσο και για την καλλιέργεια των φυτών μέσω πρόσθετων στις ζωοτροφές. Ωστόσο, οι ιχθυοτροφές δεν περιέχουν αρκετό ασβέστιο ( $\text{Ca}^+$ ) και κάλιο ( $\text{K}^+$ ) για την βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Η βακτηριακή μετατροπή της διαλυμένης αμμωνίας σε νιτρικά προκαλεί παραγωγή σε ολόκληρο το σύστημα ιόντων υδρογόνου εντός της στήλης νερού και η αύξηση αυτών των ιόντων υδρογόνου οδηγεί σε συνεχή πτώση του pH του νερού του συστήματος προς το όξινο. Για ρύθμιση της κατάστασης προστίθεται το ελλειπές ασβέστιο και κάλιο, προσθέτοντας βασικά άλατα (συχνά άλατα με βάση ανθρακικά, διττανθρακικά ή υδροξυλικά ιόντα σε συνδυασμό με ασβέστιο ή κάλιο) στο σύστημα που βοηθούν στον έλεγχο του pH νερού του συστήματος σε επίπεδο που ικανοποιεί και τα ψάρια και τα φυτά, παρέχοντας παράλληλα το επιπλέον ασβέστιο και κάλιο που χρειάζονται τα φυτά (Rakocy et al., 2006). Επιπλέον, στο σύστημα του UVI προστίθεται ένα άλλο σημαντικό θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των φυτών που δεν είναι διαθέσιμο σε τυπικές τροφές ψαριών, ο σίδηρος (Fe), μέσω τακτικών και ελεγχόμενων προσθηκών χηλικού σιδήρου. Επομένως, το κάλιο, το ασβέστιο και ο σίδηρος που απαιτούν τα φυτά που δεν βρίσκονται στην τροφή των ψαριών διατίθενται μέσω αυτών των δύο πρόσθετων μηχανισμών παροχής θρεπτικών συστατικών (Rakocy et al., 2006).

Τα αποσυνδεδεμένα ενυδρειοπονικά συστήματα υιοθετούν μια προσέγγιση στην καλλιέργεια των ψαριών και των φυτών με τρόπο που το νερό χρησιμοποιείται από τα ψάρια και τα θρεπτικά συστατικά των ψαριών παρέχονται στα φυτά, χωρίς επανακυκλοφορία του νερού πίσω στα ψάρια (Karimanzira et al., 2016). Επομένως, τα αποσυνδεδεμένα σχέδια επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία στην προσαρμογή της

χημείας του νερού, μετά τη χρήση των ψαριών, για βελτιστοποιημένη παραγωγή φυτών, επειδή η συμπλήρωση των θρεπτικών ουσιών που δεν υπάρχουν στην τροφή των ψαριών (και τα απορρίμματα ψαριών) μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να υπάρχει μέριμνα για την επιστροφή του νερού στα ψάρια (Goddek, 2017). Αυτό σημαίνει ότι οι αποσυνδεδεμένοι σχεδιασμοί ενδέχεται να εφαρμόζουν πιο απαιτητικά μείγματα θρεπτικών συστατικών στο νερό της καλλιέργειας, μετά τη χρήση στα ψάρια, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με πιο απαιτητικό και έντονο συμπλήρωμα θρεπτικών συστατικών.

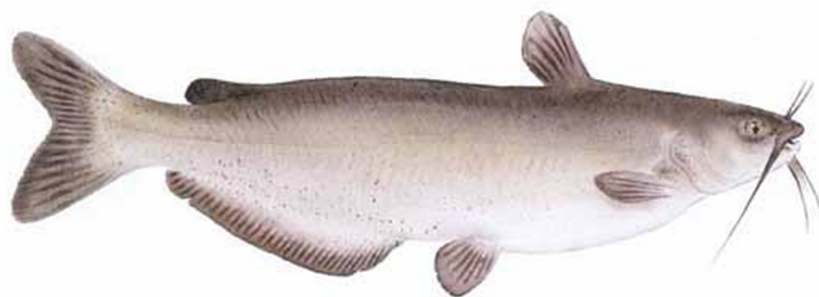
Και στις δύο περιπτώσεις (συστήματα ανακυκλοφορίας και αποσυνδεδεμένα συστήματα), είναι απαραίτητη η γνώση της χημικής ποιότητας του νερού, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών για τα φυτά. Εάν, για παράδειγμα, το νερό της πηγής περιέχει ασβέστιο (μια περίπτωση που παρατηρείται συχνά όταν χρησιμοποιούνται πόροι υπόγειων υδάτων), αυτό θα επηρεάσει και θα αλλάξει το ρυθμιστικό διάλυμα που εφαρμόζεται σε σύστημα ανακυκλοφορίας και την έκταση της συμπλήρωσης θρεπτικών ουσιών επειδή το ασβέστιο που υπάρχει στο νερό της πηγής θα αντισταθμίσει κάθε απαιτούμενο συμπλήρωμα που απαιτείται για τις ανάγκες των φυτών σε ασβέστιο (Lennard, 2017). Ή, εάν το νερό της πηγής περιέχει αυξημένες συγκεντρώσεις ιόντων νατρίου ( $\text{Na}^+$ ) (το οποίο επίσης παρατηρείται σε υπόγεια ύδατα και δεν απαιτείται από τα φυτά και δεν πρέπει να συσσωρεύεται στο νερό του συστήματος), είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πόσο υπάρχει, επομένως πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι διαχείρισης για την αποφυγή πιθανής τοξικότητας στα φυτών (Rakocy et al., 2006). Επομένως, η χημική σύσταση του νερού πηγής, είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική υγεία φυτών και ψαριών και την διαχείριση.

## 4. Ενυδρειοπονικά συστήματα

Τα ενυδρειοπονικά συστήματα είναι δύο τύπων, συνδεδεμένα και αποσυνδεδεμένα. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση και των δύο τύπων αυτών των συστημάτων, τα μέρη που απαρτίζονται, τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά τους.

### 4.1 Συζευγμένα ενυδρειοπονικά συστήματα

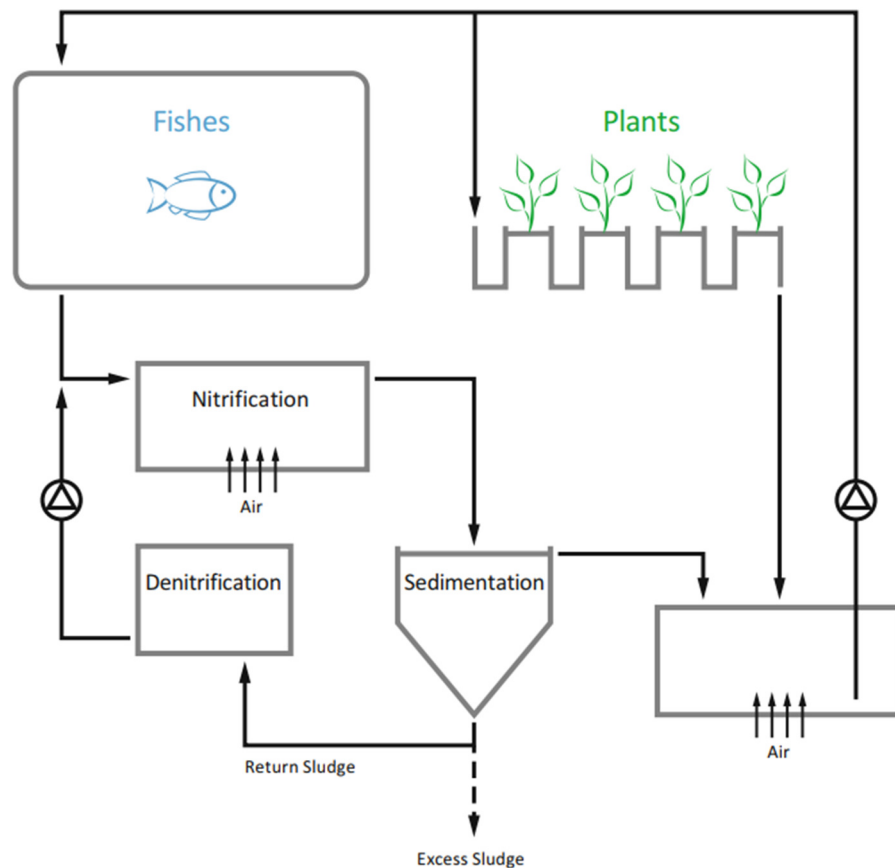
Ο συνδυασμός της καλλιέργειας ψαριών και φυτών με συζευγμένη ενυδρειοπονία χρονολογείται από 1977 και το πρώτο σχέδιο του Naegel (1977) στη Γερμανία (Εικόνα 4.1). Ο Naegel χρησιμοποίησε ένα σύστημα που αποτελούνταν από μια δεξαμενή 2000 L (Εικόνα 4.2) μέσα σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον θερμοκηπίου. Αυτό το σύστημα αναπτύχθηκε για να πιστοποιήσει τη χρήση θρεπτικών ουσιών από λύματα ψαριών, υπό πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες ανακυκλοφορίας νερού, για την παραγωγή φυτών και συμπεριελάμβανε ένα σύστημα διπλής επεξεργασίας ιλύος με αερόβια και αναερόβια επεξεργασία λυμάτων. Ο Naegel βάσισε την ιδέα του στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα του Γεωργικού Πειραματικού Σταθμού της Νότιας Καρολίνας, στις ΗΠΑ, όπου η περίσσεια θρεπτικών ουσιών από τις δεξαμενές των ψαριών, που εξέτρεφαν γατόψαρα (*Ictalurus punctatus*) (Εικόνα 4.1), χρησιμοποιούνταν για την υδροπονική παραγωγή κινέζικων νεροκάστανων (*Eleocharis dulcis*) (Loyacano and Grosvenor, 1973).



Εικόνα 4.1: *Ictalurus punctatus* (Πηγή: [tpwd.texas.gov](http://tpwd.texas.gov))

Προσθέτοντας στο σύστημα δεξαμενές νιτροποίησης και απονιτροποίησης για την αύξηση της συγκέντρωσης νιτρικών, ο Naegel (1977) επιχείρησε μια πλήρη οξειδωση όλων των αζωτούχων ενώσεων, φθάνοντας τις συγκεντρώσεις των

νιτρικών στα  $1200 \text{ mg L}^{-1}$  και απέδειξε την αποτελεσματικότητα του σταδίου νιτροποίησης. Παρόλο που το σύστημα ήταν είχε χαμηλή πυκνότητα σε ψάρια τιλάπιας (*Tilapia mossambica*) και κυπρίνου (*Cyprinus carpio*), από  $20 \text{ kg m}^{-3}$  το καθένα, οι ντομάτες (*Lycopersicon esculentum*) και το μαρούλι ποικιλίας iceberg (*Lactuca scariola*) αυξήθηκαν ικανοποιητικά δίνοντας καλή συγκομιδή. Αυτά τα πρώτα ερευνητικά αποτελέσματα οδήγησαν στην έννοια των συζευγμένων ενυδρειοπονικών συστημάτων, στα οποία τα φυτά εξαλείφουν τα απόβλητα που παράγονται από τα ψάρια, παρουσιάζοντας ικανοποιητική ανάπτυξη και αποδεικνύοντας εξαιρετικά την αποτελεσματική χρήση νερού και στις δύο μονάδες. Η αρχή της συζευγμένης ενυδρείου περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Huy Tran στο Παγκόσμιο Συνέδριο Ενυδρειοπονίας το 2015 (Tran, 2015).

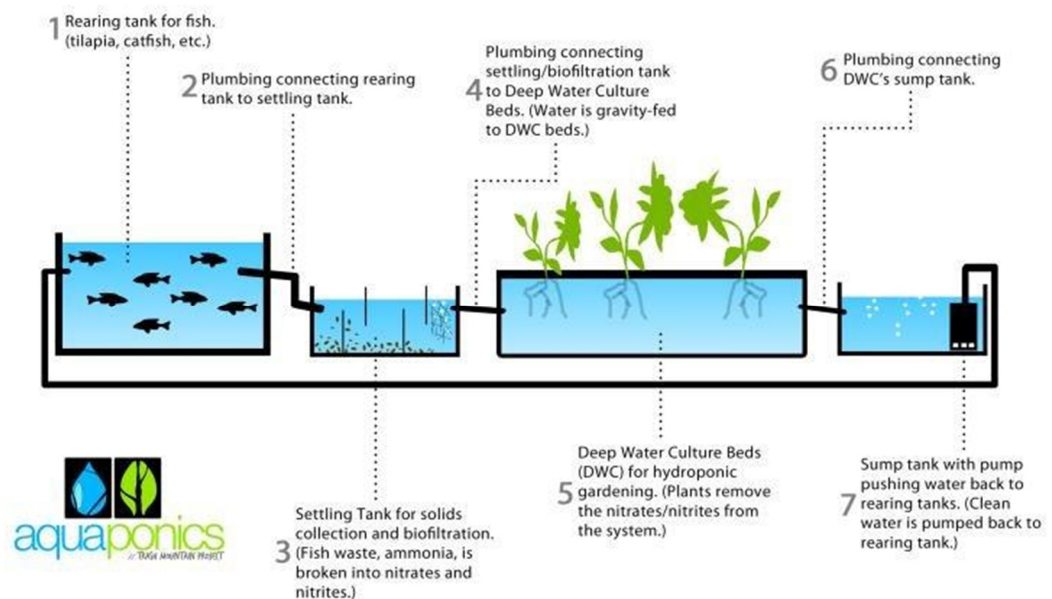


Εικόνα 4.2: Διάγραμμα του πρώτου κλειστού συστήματος ανακυκλοφορίας του Naegel για την εκτροφή τιλάπιας (*Tilapia mossambica*) και κυπρίνου (*Cyprinus carpio*) σε συνδιασμό με υδροπονική καλλιέργεια ντομάτας και μαρουλιού. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

Η ανάπτυξη της σύγχρονης γεωργίας, η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και η μείωση των πόρων παγκοσμίως, έχουν προωθήσει την



ανάπτυξη συζευγμένων ενυδρειοπονικών συστημάτων. Δεδομένου ότι η ιχθυοκαλλιέργεια είναι πολύ πιο αποτελεσματική στην παραγωγή πρωτεϊνών και τη χρήση νερού σε σύγκριση με άλλα εκτρεφόμενα ζώα και δεδομένου ότι τα κλειστά συστήματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, τα συζευγμένα συστήματα μπόρεσαν να αναπτυχθούν παγκοσμίως (Graber and Junge, 2009), υπό άγονες συνθήκες (Kotzen and Appelbaum, 2010) και ακόμη και σε αστικές περιοχές. Τα περισσότερα συστήματα ανήκουν σε εγχώριες, μικρής κλίμακας και ημι-εμπορικές εγκαταστάσεις (Palm et al., 2018) και λειτουργούν από χομπίστες και μικρές start-up εταιρείες. Τα νέα ερευνητικά αποτελέσματα, καταδεικνύουν τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς όσον αφορά τη συνεχιζόμενη εξέλιξη αυτών των συστημάτων σε εμπορικά ενυδρεία, ικανά να συμβάλουν σημαντικά στη μελλοντική παραγωγή τροφίμων.



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση συζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος (Πηγή: Panigrahi et al., 2016)

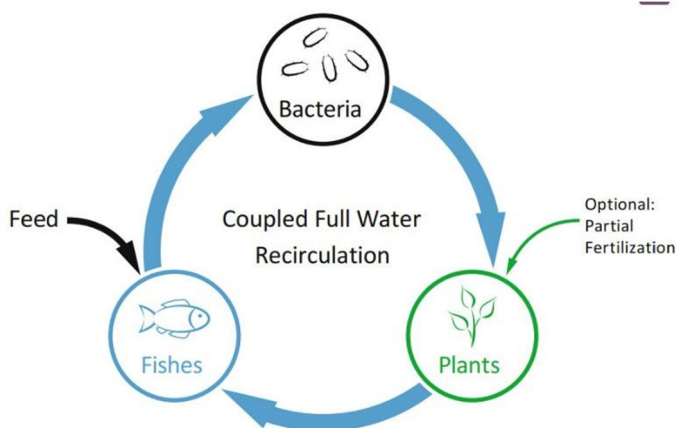
#### 4.1.1 Περιγραφή συζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος

Ένα συζευγμένο ενυδρειοπονικό σύστημα συνδυάζει τρεις κατηγορίες οργανισμών: (1) υδρόβιους οργανισμούς, (2) βακτήρια και (3) φυτά που επωφελούνται το ένα από το άλλο σε ένα κλειστό υδατικό σύστημα. Το νερό χρησιμεύει ως μέσο μεταφοράς θρεπτικών συστατικών, κυρίως από τα απορρίμματα

των ψαριών, τα οποία μετατρέπονται από τα βακτήρια σε θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Αυτά τα βακτήρια (π.χ. *Nitrosomonas spec.*, *Nitrobacter spec.*) οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδη και τέλος σε νιτρικά. Επομένως, είναι απαραίτητο για τα βακτήρια να λαμβάνουν σημαντικές ποσότητες αμμωνίας και νιτρωδών για τη σταθερή ανάπτυξη των αποικιών τους και του ρυθμού παραγωγής νιτρικών. Κατά συνέπεια, σε ένα συζευγμένο ενυδρειοπονικό σύστημα, οι ποσότητες είναι εξαιρετικά σημαντικές. Μια μονάδα ενυδρειοπονίας που ακολουθεί τις αρχές των συστημάτων ανακυκλοφορίας υδατοκαλλιέργειας (RAS), ένα υπόστρωμα βακτηριακής ανάπτυξης και ο χώρος για τα φυτά και η ποσότητα αυτών που καλλιεργούνται σχηματίζουν μια ενυδρειοπονική μονάδα (Εικόνα 4.4).

Τα συγκεκριμένα βιολογικά-χημικά συστατικά του νερού επεξεργασίας έχουν ιδιαίτερη σημασία για τα συζευγμένα ενυδρειοπονικά συστήματα. Τα υπολείμματα τροφών, τα οργανικά απόβλητα ψαριών και τα βακτήρια σε συνδυασμό με ένζυμα, υποστηρίζουν την ανάπτυξη ψαριών και φυτών. Υπάρχουν ενδείξεις ότι σε σύγκριση με τα αυτόνομα συστήματα όπως η υδατοκαλλιέργεια (ψάρια) και τα υδροπονικά (φυτά), η ανάπτυξη των υδρόβιων οργανισμών (κυρίως ψαριών) και των καλλιεργειών σε ένα συζευγμένο ενυδρειοπονικό σύστημα μπορεί να είναι παρόμοια ή ακόμη και υψηλότερη.

Ο βασικός σχεδιασμός ενός συστήματος συζευγμένης ενυδρειοπονίας αποτελείται από μία ή περισσότερες δεξαμενές ψαριών, μια μονάδα καθίζησης, ένα υποστρώματα για την ανάπτυξη των βακτηριδίων ή κατάλληλων βιολογικών φίλτρων και μια υδροπονική μονάδα ανάπτυξης φυτών (Εικόνα 4.3) Αυτές οι μονάδες συνδέονται με σωλήνες για να σχηματίσουν έναν κλειστό κύκλο νερού. Συχνά, μετά τη μηχανική διήθηση και το βιολογικό φίλτρο, χρησιμοποιείται μία αντλία (ένα σύστημα αντλίας ή ενός βρόχου) το οποίο, ως το τελευταίο σημείο του συστήματος, αντλεί το νερό πίσω στις δεξαμενές των ψαριών από όπου ρέει με βαρύτητα στην υδροπονική μονάδα.



Εικόνα 4.4: Τα στοιχεία μιας ενυδρειοπονικής μονάδας (Πηγή: Goddek et al., 2019).

Τα συζευγμένα συστήματα ενυδρειοπονίας χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές κλίμακες. Η αρχή κλειστού βρόχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οικιακά χομπίστικα συστήματα, μονάδες επίδειξης (π.χ. ζωντανοί τοίχοι), εμπορικά ενυδρεία, έως και μεγάλης κλίμακας συστήματα (Palm et al., 2018). Μια πρόσφατη εξέλιξη στην ενυδρειοπονία περιλαμβάνει τη μερική λίπανση, η οποία εξαρτάται από την ανοχή των ψαριών ανάλογα με το είδος. Αυτό, ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε βραχυπρόθεσμη κορύφωση θρεπτικών συστατικών στο σύστημα αλλά μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της κατακράτησης θρεπτικών ουσιών από τα φυτά. Στη συζευγμένη ενυδρειοπονία, πρέπει να επιτευχθεί η βέλτιστη αναλογία του όγκου των ψαριών της μονάδας υδατοκαλλιέργειας με την ζήτηση ιχθυοτροφών, καθώς και η σωστή ποσότητα φυτών που θα καλλιεργηθούν στην υδροπονική μονάδα. Επιπλέον, οι τεχνικές συνθήκες της μονάδας εκτροφής των ψαριών πρέπει να προσαρμοστούν σύμφωνα με τις ανάγκες των καλλιεργούμενων υδρόβιων ειδών.

#### 4.1.2 Δεξαμενές ενυδρειοπονικής μονάδας

Οι δεξαμενές εκτροφής ψαριών (μέγεθος, ποσότητα και σχέδιο) επιλέγονται ανάλογα με την κλίμακα παραγωγής και τα είδη των ψαριών που χρησιμοποιούνται. Ο (Rakocy et al., 2006) χρησιμοποίησε τέσσερις μεγάλες δεξαμενές εκτροφής ψαριών για την εμπορική παραγωγή του *O. niloticus* στο υβριδικό σύστημα του UVI στις ΗΠΑ. Για την παραγωγή παμφάγων ειδών ψαριών, όπως το *C. gariepinus*, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλές δεξαμενές λόγω της ταξινόμησης των μεγεθών των ψαριών και της κλιμακωτής παραγωγής (Palm et al., 2018). Οι δεξαμενές ψαριών πρέπει να

είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε τα στερεά που κατακάθονται στον πυθμένα να μπορούν αποτελεσματικά να απομακρύνονται μέσω εκροής στο κάτω μέρος. Αυτή η απομάκρυνση στερεών αποβλήτων είναι το πρώτο κρίσιμο βήμα της επεξεργασίας νερού σε συζευγμένα ενυδρειοπονικά συστήματα όπως στην περίπτωση της αποσυνδεδεμένης ενυδρειοπονίας. Τα απόβλητα προέρχονται από υπολείμματα ζωοτροφών, κόπρανα ψαριών, βακτηριακή βιομάζα και υπολείμματα των ψαριών (π.χ. λέπια) που παράγονται κατά την εκτροφή, αυξάνοντας το BOD και μειώνοντας την ποιότητα του νερού και τη διαθεσιμότητα οξυγόνου σε σχέση με τις μονάδες υδατοκαλλιέργειας και υδροπονίας. Στην ενυδρειοπονία, τα στερεά απόβλητα αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από οργανικό άνθρακα, ο οποίος χρησιμοποιείται από τα ετεροτροφικά βακτήρια για την παραγωγή ενέργειας μέσω της κατανάλωσης οξυγόνου. Όσο καλύτερη είναι η απομάκρυνση των στερεών αποβλήτων, τόσο καλύτερη είναι η γενική απόδοση του συστήματος τόσο για τα ψάρια όσο και για τα φυτά, δηλαδή με βέλτιστα επίπεδα οξυγόνωσης και χωρίς συσσώρευση σωματιδίων στη ριζόσφαιρα που αναστέλλει την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών. Οι στρογγυλές ή οβάλ δεξαμενές αποδεικνύονται ιδιαίτερα αποτελεσματικές.

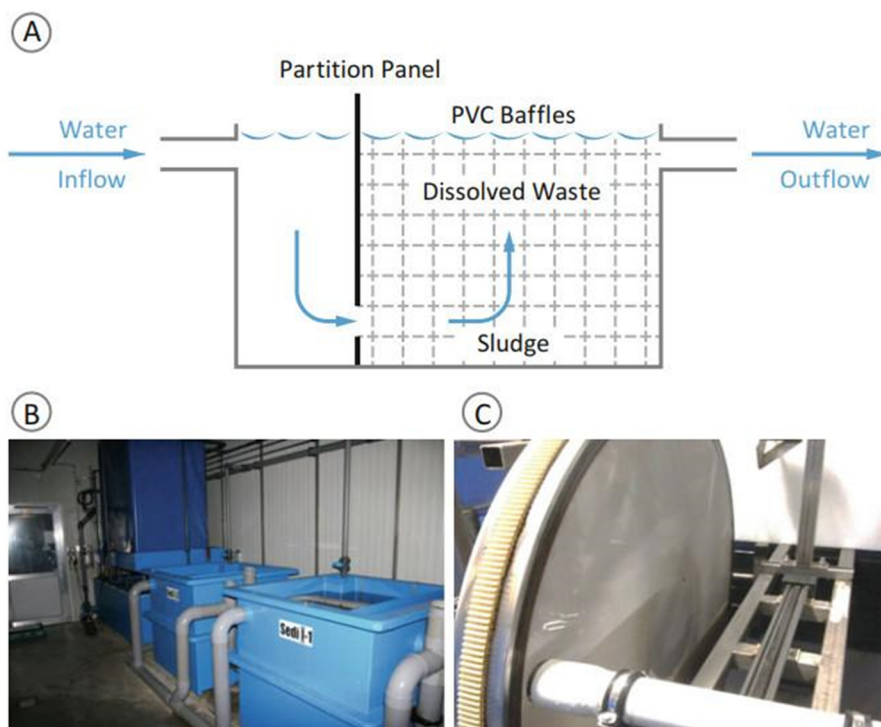
#### **4.1.3 Φιλτράρισμα**

Τα φίλτρα, που μερικές φορές ονομάζονται επίσης ιζηματοποιητές ή διαχωριστές στροβιλισμού, είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την απομάκρυνση των στερεών αποβλήτων στα συζευγμένα συστήματα (Danaher et al., 2013; Rakocy et al., 2006) (Εικόνα 4.5). Τα μεγαλύτερα σωματίδια πρέπει να αφαιρεθούν από το σύστημα για να αποφευχθούν ανοξικές ζώνες με απονιτροποιητικά αποτελέσματα ή ανάπτυξη  $H_2S$ . Τα περισσότερα φίλτρα χρησιμοποιούν ένθετα ελασμάτων ή πλάκες για να βοηθήσουν στην αφαίρεση των στερεών. Οι κωνικοί πυθμένες υποστηρίζουν τη συγκέντρωση λάσπης στο κάτω μέρος κατά τη λειτουργία και τον καθαρισμό, ενώ οι επίπεδες βάσεις απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού για να ξεπλυθούν και να αφαιρεθεί η λάσπη. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, τα στερεά βυθίζονται στο κάτω μέρος του φίλτρου για να σχηματίσουν λάσπη. Ανάλογα με την ποσότητα και το χρόνο συγκράτησης, αυτή η λάσπη μπορεί να συσσωρευτεί και να σχηματίσει σχετικά παχιά στρώματα. Η μικροβιακή δραστηριότητα εντός των στρωμάτων λάσπης μετατοπίζεται σταδιακά

προς αναερόβιες συνθήκες, ενισχύοντας την μικροβιακή απονιτροποίηση. Αυτή η διαδικασία μειώνει τα νιτρικά που είναι διαθέσιμα στα φυτά και πρέπει να αποφεύγεται, ειδικά εάν το νερό της διαδικασίας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδροπονικών φυτών. Κατά συνέπεια, η απονιτροποίηση μπορεί να είναι αντιπαραγωγική σε συζευγμένα συστήματα ενυδρείοπονίας.

Η πιο αποτελεσματική αφαίρεση στερεών αποβλήτων μπορεί να επιτευχθεί με αυτόματο τυμπανοειδές φίλτρο ή φίλτρα δίσκου που παρέχουν μηχανικά εμπόδια που συγκρατούν τα στερεά, τα οποία στη συνέχεια αφαιρούνται μέσω έκπλυσης. Οι νέες εξελίξεις στοχεύουν στη μείωση της χρήσης νερού έκπλυσης μέσω τεχνολογιών καθαρισμού κενού, επιτρέποντας τη συγκέντρωση ολικών στερεών στη λάσπη έως και 18%. Αυτή η αποτελεσματική απομάκρυνση αποβλήτων έχει θετική επίδραση στη σύνθεση της λάσπης, βελτιώνοντας τον έλεγχο των λυμάτων προκειμένου να καλυφθούν καλύτερα οι απαιτήσεις της καλλιέργειας. Μια άλλη επιλογή είναι η εφαρμογή πολλαπλών ζηματοποιητών ή μηχανών αφαίρεσης λάσπης στη σειρά.

Τα βιολογικά φίλτρα είναι ένα άλλο ουσιαστικό μέρος των RAS, καθώς μετατρέπουν το αμμωνιακό άζωτο μέσω μικροβιακής οξείδωσης σε νιτρικά (νιτροποίηση). Παρόλο που οι ρίζες των φυτών και το ίδιο το σύστημα παρέχουν επιφάνειες για τα βακτήρια νιτροποίησης, η ικανότητα ελέγχου της ποιότητας του νερού είναι περιορισμένη. Τα συστήματα που δεν έχουν βιοφίλτρα περιορίζονται σε εγκαταστάσεις μικρές ή χομπίστικες με χαμηλές απαιτήσεις. Μόλις αυξηθεί η βιομάζα των ψαριών και η ποσότητα των ζωοτροφών, απαιτείται επιπλέον χωρητικότητα βιολογικού φίλτρου για τη διατήρηση της ποιότητας επαρκούς ποιότητας νερού για την καλλιέργεια των ψαριών και για την παροχή επαρκών ποσοτήτων νιτρικών για την ανάπτυξη των φυτών. Τα σύγχρονα βιολογικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλα RAS είναι αποτελεσματικά στην παροχή επαρκούς ικανότητας νιτροποίησης για την παραγωγή ψαριών και φυτών. Λόγω του αυξημένου κόστους επένδυσης, αυτά τα στοιχεία είναι πιο εφαρμόσιμα σε εμπορικά ενυδρείοπονικά συστήματα μεσαίας και μεγαλύτερης κλίμακας.



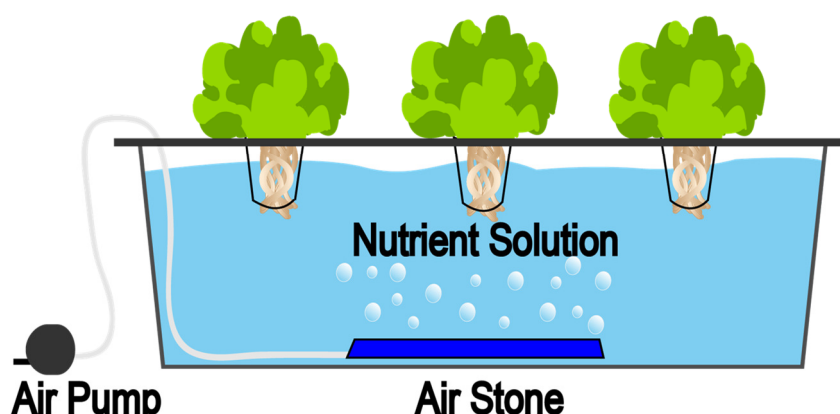
Εικόνα 4.5: Αρχή λειτουργίας φίλτρου με ιζηματοποιητή (A-B) και φίλτρο δίσκου σε εμπορική ιχθυοκαλλιέργεια γατόψαρου (*Clarias gariepinus*) (Πηγή: Goddek et al., 2017)

#### 4.1.4 Υδροπονία στα συζευγμένα συστήματα ενυδρείοπονίας

Στα συζευγμένα συστήματα ενυδρείοπονίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα υδροπονικών υποσυστημάτων ανάλογα με την κλίμακα λειτουργίας (Palm et al., 2018). Εάν το εργατικό δυναμικό δεν αποτελεί πρόβλημα σε θέμα κόστους ή παραγωγικότητας και το σύστημα δεν είναι πολύ μεγάλο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα διαφορετικά υδροπονικά υποσυστήματα. Αυτό είναι συνηθισμένο στα οικιακά και τα ενυδρεία επίδειξης που συχνά χρησιμοποιούν συστήματα υποστρώματος (άμμος, χαλίκι, περλίτη κ.λπ.) και η καλλιέργεια γίνεται μέσω ροής σε βάθος νερού ή σε επιπέδου υποστρώματα. Με την περισσότερη εργασία είναι τα συστήματα με στρώματα μέσω των οποίων όπως άμμος ή χαλίκι που τροφοδοτούνται με ροή νερού και τα οποία μπορούν να φράξουν λόγω της εναπόθεσης των υπολειμμάτων και συχνά πρέπει να πλυθούν (Rakocy et al., 2006). Λόγω του χειρισμού των υποστρωμάτων, αυτά τα συστήματα έχουν συνήθως περιορισμένο μέγεθος. Από την άλλη πλευρά, τα υδροπονικά υποσυστήματα deep water culture, DWC, απαιτούν λιγότερη εργασία και χρειάζονται λιγότερη

συντήρηση, επιτρέποντάς τα να υιοθετηθούν για μεγαλύτερες επιφάνειες φύτευσης. Τα DWC συστήματα είναι αυτά στα οποία μικρές σχεδίες, κυρίως από φελιζόλ, φέρουν τα φυτά και πλέουν πάνω σε νερό δεξαμενών ενώ οι ρίζες των φυτών είναι εκτεθειμένες στο νερό και τα θρεπτικά του (Εικόνα 4.6). Τα υποσυστήματα DWC βρίσκονται κυρίως σε μικρά συστήματα, και όχι σε συστήματα μεγάλης κλίμακας. Για μεγάλη εμπορική ενυδρειοπονική παραγωγή, το ποσό εργασίας και συντήρησης ενός συστήματος DWC εξακολουθεί να θεωρείται πολύ υψηλό. Ακόμη και η χρήση υδάτινων πόρων και ενέργειας για άντληση είναι επίσης ένας ανασταλτικός παράγοντας για συστήματα μεγάλης κλίμακας.

## Deep Water Culture (DWC)

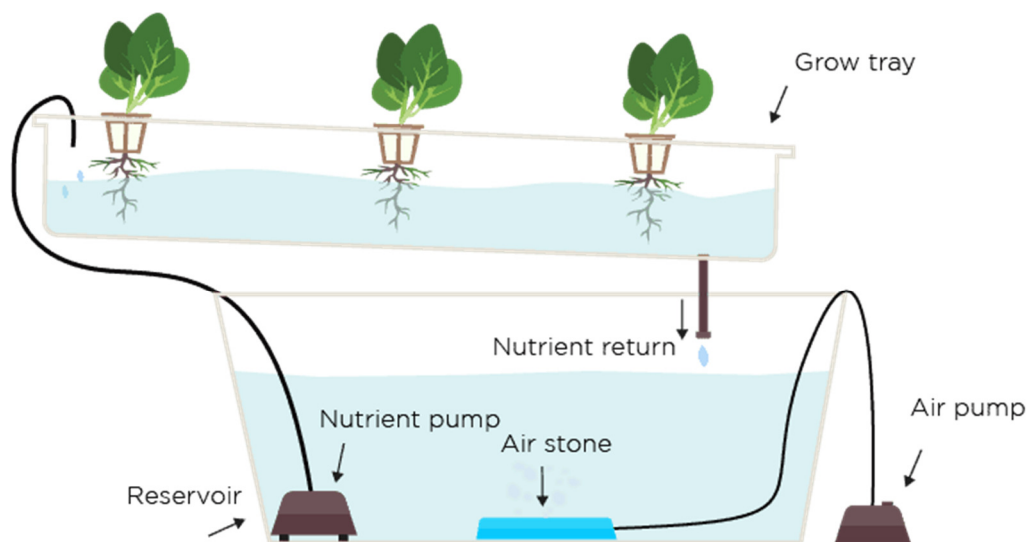


Εικόνα 4.6: Υδροπονικό σύστημα Deep Water Culture, DWC. (Πηγή: [www.alpineconcern.com](http://www.alpineconcern.com))

Εάν το αποσυνδεδεμένο σύστημα έχει σχεδιαστεί για κερδοσκοπική παραγωγή, η χρήση εργασίας πρέπει να μειωθεί ενώ η περιοχή παραγωγής πρέπει να αυξηθεί. Αυτό είναι δυνατό μόνο με τον εξορθολογισμό της παραγωγής ψαριών σε συνδυασμό με την εφαρμογή εύχρηστων υδροπονικών υποσυστημάτων. Η τεχνική μεμβράνης θρεπτικών συστατικών (Nutrient Film Technique, NFT) (Εικόνα 4.7) μπορεί, επί του παρόντος, να θεωρηθεί το πιο αποτελεσματικό υδροπονικό σύστημα, συνδυάζοντας χαμηλή εργασία με μεγάλες περιοχές καλλιέργειας φυτών και καλή αναλογία κόστους νερού, ενέργειας και επενδύσεων.

Ωστόσο, δεν αναπτύσσονται καλά όλα τα υδρόβια φυτά σε συστήματα NFT και ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να βρεθεί η σωστή επιλογή φυτού για κάθε

υδροπονικό υποσύστημα, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την παροχή θρεπτικών συστατικών ενός συγκεκριμένου είδους ψαριού που ενσωματώνεται σε ένα συγκεκριμένο υδροπονικό υποσύστημα. Για συζευγμένα ενυδρειοπονικά συστήματα, το μερικές φορές υψηλότερο φορτίο σωματιδίων στο νερό μπορεί να είναι πρόβλημα προκαλώντας το φράξιμο, σωλήνων και βαλβίδων σε εγκαταστάσεις με NFT. Ως εκ τούτου, τα μεγάλα ενυδρειοπονικά συστήματα πρέπει να περιέχουν επαγγελματική διαχείριση νερού με αποτελεσματική μηχανική διήθηση για να αποφευχθούν μπλοκάρισμα στην ανακυκλοφορία νερού. Όταν διασφαλίζεται η συνεχής παροχή νερού μέσω των σωλήνων, το σύστημα NFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους συζευγμένων υδάτινων συστημάτων, αλλά συνιστάται περισσότερο για παραγωγή σε μικρά / ημι-εμπορικά συστήματα και συστήματα μεγάλης κλίμακας (Palm et al., 2018).



Εικόνα 4.7: Τεχνητή μεμβράνης θρεπτικών συστατικών (Nutrient Film Technique, NFT). Το νερό με τα θρεπτικά επανέρχεται σε μια δεξαμενή όπου συμπληρώνεται και ξαναστέλνεται στα φυτά. (Πηγή: [www.alpineconcern.com](http://www.alpineconcern.com))

#### 4.2 Αποσυνδεδεμένα ενυδρειοπονικά συστήματα

Τα συνδεδεμένα ενυδρειοπονικά συστήματα λειτουργούν με έναν βρόχο που κατευθύνει το νερό που είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά από τα ψάρια στα φυτά και πάλι πίσω. Λόγο των διαφορετικών απαιτήσεων σε θρεπτικά και περιβαλλοντικές συνθήκες, φυτών και ψαριών, τέτοια συστήματα παρουσιάζουν συμβιβασμούς στις ιδανικές συνθήκες για την εκτροφή και των δύο, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα τέτοιων συστημάτων. Τα σχέδια που επιτρέπουν την



αποσύνδεση των επιμέρους μονάδων προβλέπουν μια βελτιστοποιημένη επεξεργασία του νερού σε κάθε μία από τις αντίστοιχες μονάδες, ενώ επιτρέπει επίσης την καλύτερη ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών από τη λάσπη. Τα αιωρούμενα στερεά από τα ψάρια (π.χ. κόπρανα και τροφές που δεν καταναλώθηκαν) πρέπει να αφαιρεθούν από το νερό επεξεργασίας προτού το νερό διοχετευτεί στα φυτά προκειμένου να αποφευχθεί η απόφραξη των υδροπονικών συστημάτων, ένα βήμα που προκαλεί σημαντική απώλεια συνολικών θρεπτικών ουσιών, κυρίως φωσφόρου. Η επαναχρησιμοποίηση της λάσπης και η κινητοποίηση των θρεπτικών συστατικών που περιέχονται σε αυτή, παρουσιάζουν μια σειρά από τεχνικές προκλήσεις που, εάν αντιμετωπιστούν δημιουργικά, μπορούν να αυξήσουν δραματικά την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των ενυδρειοπονικών συστημάτων. Μία λύση είναι ο διαχωρισμός, ή όταν υπάρχουν παθογόνα ή προβλήματα παραγωγής, η απομόνωση των επιμέρους μονάδων του συστήματος, μεγιστοποιώντας έτσι τον συνολικό έλεγχο και την αποτελεσματικότητα κάθε μονάδας, μειώνοντας παράλληλα τους συμβιβασμούς μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών που απαιτεί κάθε είδος, κάθε υποσυστήματος.

Μια άλλη καινοτομία που γίνεται δυνατή με την αποσύνδεση των μονάδων περιλαμβάνει την εισαγωγή πρόσθετων βρόχων στους οποίους μπορεί να γίνει επεξεργασία της ιλύος. Ένας επιπλέον βρόχος εισαγωγής θρεπτικών μπορεί να εξασφαλίσει αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών στη υδροπονική μονάδα, ενώ, ταυτόχρονα, να μειώσει τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ψαριών από υψηλά επίπεδα θρεπτικών ουσιών από την μονάδα RAS. Αρκετές μελέτες έχουν τεκμηριώσει την αερόβια και αναερόβια χώνευση των βιο-αντιδραστήρων για την επεξεργασία της λάσπης, αλλά τα οφέλη του της διαδικασίας χώνευσης στην ανάπτυξη των φυτών δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς. Τόσο τα παράγωγα της ανοργανοποίησης και της εκχύλισης έχουν υψηλό ερευνητικό ενδιαφέρον για τη βελτίωση των αποσυνδεδεμένων ενυδρειοπονικών συστημάτων.

#### **4.2.1 Περιγραφή αποσυνδεδεμένου ενυδρειοπονικού συστήματος**

Τα αποσυνδεδεμένα συστήματα διαφέρουν από τα συζευγμένα στο ότι διαχωρίζουν τον βρόγχο νερού και θρεπτικών συστατικών μεταξύ της μονάδας υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονικής μονάδας και έτσι παρέχουν έλεγχο της

χημείας του νερού και στα δύο συστήματα. Οι εικόνες 4.8-10 παρέχουν μια σχηματική επισκόπηση ενός παραδοσιακού συζευγμένου συστήματος (Α), ενός αποσυνδεδεμένου συστήματος δύο βρόχων (Β) και ενός αποσυνδεδεμένου συστήματος πολλαπλών βρόχων (C). Ωστόσο, υπάρχει σημαντική συζήτηση σχετικά με το εάν τα αποσυνδεδεμένα συστήματα ενυδρειοπονίας είναι οικονομικά συμφέροντα έναντι των πιο παραδοσιακών συστημάτων, δεδομένου ότι απαιτούν περισσότερες υποδομές. Προκειμένου να απαντηθεί αυτή η ερώτηση, είναι απαραίτητο να εξεταστούν διαφορετικά σχέδια συστημάτων προκειμένου να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες τους.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός συζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος ενός βρόχου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8, μπορεί να θεωρηθεί ως η παραδοσιακή βάση όλων των ενυδρειοπονικών συστημάτων στα οποία το νερό κυκλοφορεί ελεύθερα μεταξύ των μονάδων υδατοκαλλιέργειας και υδροπονίας, ενώ η πλούσια σε θρεπτικά ιλύς αποβάλλεται. Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα τέτοιων συστημάτων είναι ότι είναι απαραίτητο να γίνουν αντισταθμίσεις στις συνθήκες εκτροφής και των δύο υποσυστημάτων όσον αφορά το pH, τη θερμοκρασία και τις συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών (Πίνακας 4.1).

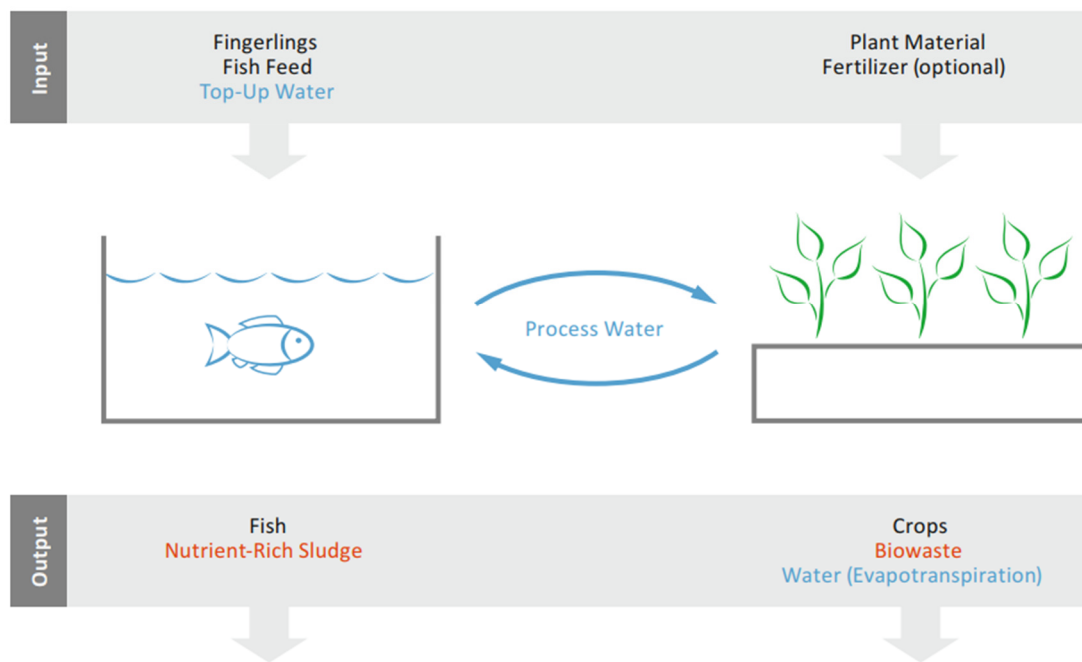
**Πίνακας 4.1: Βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης για ψάρια και φυτά και ανακύκλωση των θρεπτικών της ιλύος**

Υποσύστημα	Είδος \ διεργασία	pH	Θερμοκρασία (°C)	Νιτρικά (NO <sub>3</sub> ) (mg/L)
Recirculating Aquaculture System (RAS)	Oreochromis niloticus (τυλάπια του Νείλου)	7–9	27–30	<100–200
	Oncorhynchus mykiss (πέστροφα)	6.5 – 8.5	15	<40
Υδροπονικό	Lactuca sativa (μαρούλι)	5.5 – 6.5	21–25	730
	Lycopersicon esculentum (ντομάτα)	6.3 – 6.5	18–24	666
Αναερόβιος αντιδραστήρας	Μεθανογένεση	6.8 – 7.4	30–35	–
	Κινητοποίηση ιλύος	4.0	n/a	

Αντίθετα, τα αποσυνδεδεμένα συστήματα ή τα συστήματα δύο βρόχων

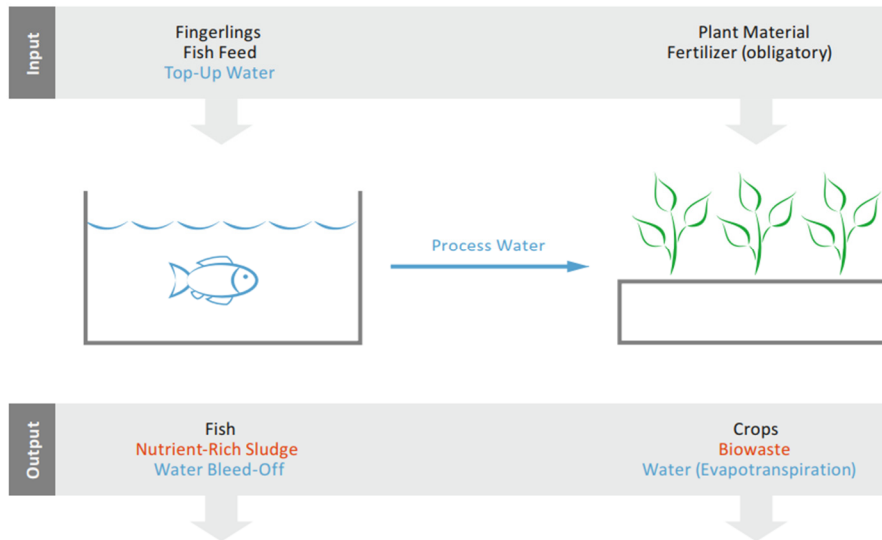
διαχωρίζουν τις μονάδες υδατοκαλλιέργειας και ενυδρειοπονίας μεταξύ τους (Εικόνα 4.9). Εδώ, το μέγεθος της υδροπονικής μονάδας είναι κρίσιμης σημασίας, επειδή ιδανικά πρέπει να αφομοιώσει τα θρεπτικά συστατικά που παρέχονται από τη μονάδα των ψαριών απευθείας ή μέσω ανοργανοποίησης της ιλύος (π.χ. εξαγωγή θρεπτικών ουσιών από τη λάσπη και παροχή της στα φυτά σε διαλυτή μορφή). Πράγματι, τόσο το μέγεθος της περιοχής καλλιέργειας του φυτού όσο και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. επιφάνεια, δείκτης φυλλικής επιφάνειας, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ.) καθορίζουν την ποσότητα του νερού που μπορεί να εξατμιστεί και είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το ρυθμό αντικατάστασης νερού. Το νερό που αποστέλλεται από το RAS στην υδροπονική μονάδα αντικαθίσταται συνεχώς από καθαρό νερό που μειώνει τις συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών και έτσι βελτιώνει την

### A. Coupled (One-Loop) System



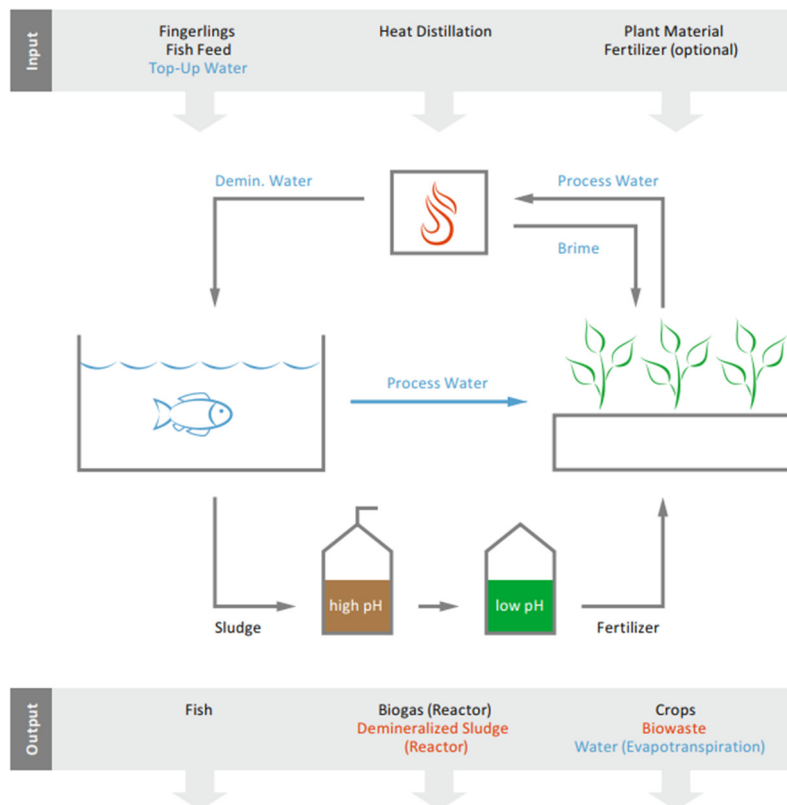
Εικόνα 4.8: Ενυδρειοπονικό σύστημα ενός βρόγχου. Με μπλε γράμματα και βέλη είναι η ροή του νερού και με κόκκινο τα απορρίμματα. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

### B. Decoupled (Two-Loop) System



Εικόνα 4.9: Απλό αποσυνδεδεμένο ενυδρειοπονικό σύστημα. Με μπλε γράμματα και βέλη είναι η ροή του νερού και με κόκκινο τα απορρίμματα. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

### C. Decoupled (Multi-Loop) System



Εικόνα 4.10: Αποσυνδεδεμένο ενυδρειοπονικό σύστημα πολλαπλών βρόγχων. Με μπλε γράμματα και βέλη είναι η ροή του νερού και με κόκκινο τα απορρίμματα. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

ποιότητα του νερού (Monsees et al., 2017). Η ποσότητα νερού που μπορεί να αντικατασταθεί εξαρτάται από τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής φυτών που εξαρτάται από την καθαρή ακτινοβολία, την θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την σχετική υγρασία και είδη καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια εποχιακή εξάρτηση, με περισσότερο νερό να εξατμίζεται στις θερμότερες, πιο ηλιόλουστες εποχές, όπως επίσης και όταν οι ρυθμοί ανάπτυξης των φυτών είναι υψηλότεροι. Αυτή η προσέγγιση έχει προταθεί από τους Goddek et al., 2015 και Kloas et al., 2015 ως προσέγγιση για τη βελτίωση του σχεδιασμού συστημάτων ενός βρόχου και την καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας για διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης ανάπτυξης των φυτών.

Παρά τα πιθανά οφέλη, αρχικά πειράματα με αποσυνδεδεμένο σύστημα ενός βρόχου ανέδειξαν σοβαρά μειονεκτήματα. Αυτά προέκυψαν από τις υψηλές ποσότητες πρόσθετων θρεπτικών ουσιών που χρειάζονταν να προστεθούν στον υδροπονικό βρόχο, δεδομένου ότι το νερό που ρέει από το RAS στον υδροπονικό σύστημα εξαρτάται καθαρά από την εξατμοδιαπνοή (Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015). Τα θρεπτικά συστατικά τείνουν επίσης να συσσωρεύονται στα συστήματα RAS όταν τα ποσοστά εξατμοδιαπνοής είναι χαμηλά και μπορούν να φθάσουν σε κρίσιμα επίπεδα, απαιτώντας έτσι περιοδική απόρριψη νερού.

Για την λύση αυτών των μειονεκτημάτων απαιτείται εφαρμογή πρόσθετων βρόχων για τη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται στο σύστημα (Goddek et al., 2019). Τέτοια συστήματα πολλαπλών βρόχων περιγράφονται στην εικόνα 4.10 και ενισχύουν την προσέγγιση δύο βρόχων (Εικόνα 4.9), οι οποίοι είναι:

1. Αποτελεσματικής ανοργανοποίηση θρεπτικών συστατικών και κινητοποίηση, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αναερόβιου αντιδραστήρα δύο σταδίων για τη μείωση της απόρριψης θρεπτικών ουσιών από την ιλύ των ψαριών.
2. Τεχνολογίας θερμικής εκχύλισης / αφαλάτωσης για τη συμπύκνωση του θρεπτικού διαλύματος στη μονάδα υδροπονίας προκειμένου να μειωθεί η ανάγκη για επιπλέον λιπάσματα.

#### 4.2.2 Βρόγχος ανοργανοποίησης

Στα συστήματα RAS, η λάσπη και τα στερεά που είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά πρέπει να αφαιρεθούν από το σύστημα για να διατηρηθεί η ποιότητα του νερού. Με την προσθήκη ενός επιπλέον βρόχου ανακύκλωσης ιλύος, τα συσσωρευμένα απόβλητα του RAS μπορούν να μετατραπούν σε διαλυμένα θρεπτικά συστατικά για επαναχρησιμοποίηση από τα φυτά αντί να απορριφθούν (Emerenciano et al., 2017). Μέσα στους βιοαντιδραστήρες, οι μικροοργανισμοί μπορούν να διασπάσουν αυτή τη λάσπη σε βιοδιαθέσιμα θρεπτικά συστατικά, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να δοθούν στα φυτά (Delaide et al., 2016; Goddek, 2017; Monsees et al., 2017). Πολλά συζευγμένα συστήματα ενυδρείοποιίας ενός βρόχου περιλαμβάνουν ήδη αερόβια (J. E. Rakocy et al., 2004) και αναερόβια χωνευτήρια για να μετασχηματίσουν τα θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν στη λάσπη των ψαριών και τα καθιστούν βιοδιαθέσιμα για φυτά. Ωστόσο, η ενσωμάτωση ενός τέτοιου συστήματος σε ένα συζευγμένο σύστημα ενός βρόχου έχει πολλά μειονεκτήματα:

1. Ο συντελεστής αραίωσης των πλούσιων σε θρεπτικά αποβλήτων, είναι πολύ υψηλότερος κατά την απόρριψή τους σε ένα σύστημα απλού βρόχου σε σχέση με την απόρριψή τους μόνο στη μονάδα υδροπονίας. Τα θρεπτικά συστατικά αραιώνονται όταν έρχονται σε επαφή με μεγάλες ποσότητες νερού εκτροφής ψαριών.
2. Τα ψάρια εκτίθενται άσκοπα στα λύματα του αντιδραστήρα ανοργανοποίησης. π.χ. τα απόβλητα των αναερόβιων αντιδραστήρων μπορεί να περιλαμβάνουν πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) και αμμωνία που ενδέχεται να βλάψουν τα ψάρια. Τέτοιοι αντιδραστήρες αντιπροσωπεύουν επίσης μια πρόσθετη πηγή για πιθανή εισαγωγή παθογόνων.
3. Περίπου το 90% των θρεπτικών ουσιών που υπάρχουν στην ιλύ μπορεί να ανακτηθεί όταν η λάσπη RAS διατηρείται σε pH 4 (Jung and Lovitt, 2011). Ένα τέτοιο χαμηλό pH δεν είναι δυνατό κατά τη λειτουργία βιοαντιδραστήρων σε pH περίπου 7 (Goddek et al., 2015), που είναι η συνήθης τιμή ανταλλαγής pH στα συστήματα ενός βρόχου.

Όσον αφορά το pH, η εικόνα 4.11 δείχνει τις κατά προσέγγιση τιμές pH των

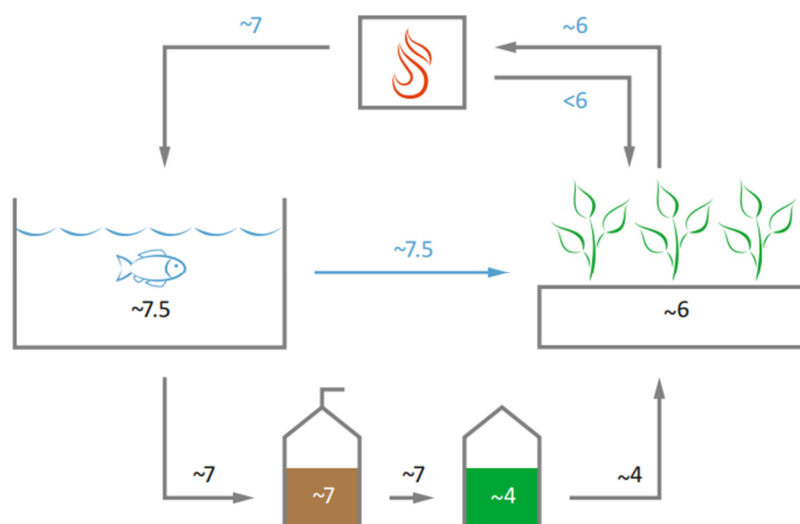
αντίστοιχων ροών νερού σε ένα σύστημα πολλαπλών βρόχων (π.χ. όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.10). Η εικόνα 4.11 δείχνει επίσης την επίδραση των αντιδραστήρων ανοργανοποίησης στην απόδοση του συστήματος στο σύνολό του, με βάση τους αναερόβιους αντιδραστήρες που πρότειναν οι Goddek et al. (2015). Ένα τέτοιο σύστημα αντιπροσωπεύει μόνο μία πιθανή λύση για την επεξεργασία της ύλης. Η μείωση του pH του επεξεργασμένου νερού που ρέει από το υποσύστημα RAS στον υδροπονικό βρόχο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11 δείχνει οξίνιση στον βρόχο συγκέντρωσης θρεπτικών ουσιών (το απιονισμένο νερό έχει pH 7). Έτσι, τα λύματα έχουν χαμηλότερο pH από το νερό εξόδου του RAS, το οποίο μειώνει την ανάγκη προσαρμογής του pH για βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης των φυτών.

Ο αντιδραστήρας δύο σταδίων λειτουργεί ως εξής:

1. Στο πρώτο στάδιο (pH περίπου 7 για την παροχή βέλτιστων συνθηκών για παραγωγή μεθανίου, πίνακας 4.1), η οργανική ύλη διασπάται για να διατηρηθεί ένας υψηλός βαθμός παραγωγής μεθανίου (δηλαδή απομάκρυνση άνθρακα). Οι (Mirzoyan and Gross, 2013) ανέφεραν συνολική μείωση των αιωρούμενων στερεών περίπου 90%, χρησιμοποιώντας αναερόβιο αντιδραστήρα κάλυψης ύλης. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι (1) το βιοαέριο συλλέγεται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και (2) παράγονται λιγότερα VFA στο δεύτερο στάδιο. Ο χρόνος κατακράτησης λάσπης στο πρώτο στάδιο είναι αρκετοί μήνες, προτού αφαιρεθούν τα συσσωρευμένα θρεπτικά συστατικά από τη λάσπη στο δεύτερο στάδιο.
2. Στο δεύτερο στάδιο, τα θρεπτικά συστατικά στα αιωρούμενα στερεά κινητοποιούνται για να γίνουν διαθέσιμα για λήψη από τα φυτά. Αυτή η κινητοποίηση είναι η πιο αποτελεσματική σε περιβάλλον χαμηλού pH (Goddek, 2017; Jung and Lovitt, 2011). Μόλις μειωθεί το pH στους όξινους αντιδραστήρες, συνήθως παραμένει σταθερό. Κατά συνέπεια απαιτείται λιγότερη ρύθμιση του pH στην υδροπονική μονάδα.

Τα λύματα που είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά μπορεί να απαιτούν κάποια μετα-επεξεργασία ανάλογα με την ποσότητα των μετρούμενων ολικών αιωρούμενων στερεών και VFA. Ωστόσο, είναι σημαντικό να θυμάστε ότι η αμμωνία μπορεί να διεγείρει την ανάπτυξη των φυτών, π.χ. φυλλώδη λαχανικά, όταν

αντιπροσωπεύει το 5–25% της συνολικής συγκέντρωσης αζώτου (Jones Jr, 2016). Ωστόσο, καρποφόρα λαχανικά όπως ντομάτες ή γλυκές πιπεριές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην αμμωνία του θρεπτικού διαλύματος. Μια αερόβια επεξεργασία μετά την εκροή θα είναι απαραίτητη σε συστήματα καλλιέργειας αυτών των τύπων καλλιεργειών.



Εικόνα 4.11: Τιμές pH ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος καθώς και στις ροές νερού. (Πηγή: Goddek et al., 2019).

#### 4.2.3 Βρόγχος εκχύλιση/αφαλάτωσης

Σε αποσυνδεδεμένα συστήματα, υπάρχει μονόδρομη ροή από το RAS προς την υδροπονική μονάδα. Στην πράξη, τα φυτά δέχονται το νερό που παρέχεται από το RAS, το οποίο με τη σειρά του συμπληρώνεται με φρέσκο νερό. Η απαραίτητη εκροή από τη μονάδα RAS είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ του νερού που εξέρχεται από το υδροπονικό σύστημα μέσω των φυτών (και μέσω της μονάδας εκχύλισης) και του νερού που εισέρχεται στη μονάδα υδροπονίας από τον αντιδραστήρα ανόργανοποίησης, εάν το σύστημα περιλαμβάνει αντιδραστήρα (Εικόνα 19). Συνοπτικά θα λέγαμε ότι η μακροπρόθεσμη απαίτηση σε νερό από το RAS έως την υδροπονική μονάδα, είναι ίση με την κατανάλωση νερού της καλλιέργειας, λόγω εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης νερού στη βιομάζα του φυτού.

Ο ρόλος της μονάδας εκχύλισης είναι να διατηρεί την συγκέντρωση των θρεπτικών ουσιών στο διάλυμα του RAS και του υδροπονικού συστήματος, σε επιθυμητά επίπεδα.



Ωστόσο, όσον αφορά την ισορροπία μάζας, η ποσότητα των θρεπτικών ουσιών που εξέρχονται από το υδροπονικό σύστημα μέσω των φυτών πρέπει να αντικατασταθεί για να εξασφαλιστεί μια σταθερή ισορροπία. Αυτό δημιουργεί δίλημμα, καθώς η μέγιστη ανεκτή συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών στο RAS είναι πολύ χαμηλότερη από ό, τι είναι απαραίτητο στην υδροπονική μονάδα. Οι υψηλές ροές θρεπτικών ουσιών που απαιτεί η υδροπονική μονάδα δεν μπορούν επομένως να επιτευχθούν από τις χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών του RAS. Αντ' αυτού, χωρίς βρόχο εκχύλισης / αφαλάτωσης, η συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών θα αυξανόταν στο RAS ενώ θα μειωνόταν στο υδροπονικό σύστημα. Μια πιθανή λύση είναι η απόρριψη νερού του RAS (και επομένως και θρεπτικών ουσιών) για τη μείωση της συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών εκεί και την προσθήκη λιπάσματος στο υδροπονικό θρεπτικό διάλυμα. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις, αυτή η λύση είναι λιγότερο ικανοποιητική και δεν εξυπηρετεί το στόχο μιας συνδυασμένης παραγωγής κλειστού βρόχου.

Η υλοποίηση μιας μονάδας εκχύλισης όπως φαίνεται στην εικόνα 19 αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση για αυτό το δίλημμα. Τέτοιες τεχνολογίες εκχύλισης (π.χ. εκχύλιση θερμικής μεμβράνης) έχουν τη δυνατότητα να διαχωρίσουν τα διαλυμένα άλατα και θρεπτικά συστατικά από το νερό (Shahzad et al., 2017; Subramani and Jacangelo, 2015). Στο πλαίσιο των συστημάτων πολλαπλών βρόχων, και ως εναλλακτική λύση στην πρόσθετη λίπανση και απόρριψη νερού με αντίστοιχο επιπλέον κόστος, αυτή η τεχνολογία δεν θα μπορούσε να παρέχει μόνο γλυκό νερό στο σύστημα αλλά και να επιτύχει τις επιθυμητές συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών για τα αντίστοιχα υποσυστήματα.

## 5. Ενυδραιοπονία αλμυρού νερού

Αν και η ενυδραιοπονία του γλυκού νερού είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη, εφαρμοζόμενη και με τις περισσότερες μελέτες και έρευνες, οι πόροι του γλυκού νερού για την παραγωγή τροφίμων (γεωργία και υδατοκαλλιέργεια) γίνονται όλο και πιο περιορισμένοι και η αλατότητα του εδάφους αυξάνεται προοδευτικά σε πολλά μέρη του κόσμου (Fronte et al., 2016; Turcios and Papenbrock, 2014). Αυτό έχει οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για την μετάβαση σε εναλλακτικές πηγές νερού (π.χ. υφάλμυρα έως πολύ αλμυρά νερά) και τη χρήση ψαριών αλμυρού νερού, αλόφυτων (φυτών ανθεκτικών σε υψηλές αλατότητες), φυκιών και φυτών ανεκτών σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα νατρίου (Buhmann and Papenbrock, 2013; Joesting et al., 2016). Η ενυδραιοπονία αλμυρού νερού (saltwater aquaponics, SA) είναι ένα σύστημα ολοκληρωμένης πολύ-τροφικής ενυδραιοπονίας που εκτελείται στην ξηρά (δεξαμενές) και που συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια παραγωγής θαλασσινών (π.χ. ψάρια, μαλακόστρακα, μαλάκια κ.λπ.) με την υδροπονική παραγωγή υδρόβιων φυτών (π.χ. φύκια, άλγη, αλόφυτα, φυτά ανθεκτικά σε μέτριες αλατότητες, κλπ.) σε ένα εύρος αλατότητας από χαμηλό (π.χ. υφάλμυρο νερό) έως υψηλό (π.χ. θαλασσινό νερό) (Boxman et al., 2015; Pantanella, 2012). Ο όρος θαλασσοπονία (δηλ. Θαλάσσια ενυδραιοπονία) έχει επίσης επινοηθεί για συστήματα SA που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό. Αυτά βρίσκονται κυρίως στην ξηρά, σε παράκτιες τοποθεσίες κοντά σε μια πηγή θαλασσινού νερού (Gunning et al., 2016).

### 5.1 Συνδυασμένη με αλόφυτα.

Μελέτες έδειξαν ότι τα αλοφύτα μπορούν να αρδευθούν επιτυχώς με λύματα υδατοκαλλιέργειας αλμυρού νερού (Díaz et al., 2013). Η ιδέα της ανάπτυξης αλοφύτων μέσω υδροπονικών τεχνικών ή ως μέρος ενός συστήματος SA είναι πολύ νέα. Οι Waller et al. (2015) διερεύνησαν τη σκοπιμότητα της ανακύκλωσης θρεπτικών συστατικών από αλμυρό νερό (αλατότητα 16 psu) σε ενυδραιοπονικό σύστημα ανακύκλωσης νερού (Recycling Aquaculture System, RAS) για ευρωπαϊκά λαβράκια (*Dicentrarchus labrax*) (Εικ. 5.1) μέσω της υδροπονικής παραγωγής τριών αλόφυτων, *Triplolium rannonicum*, *Plantago coronopus* και *Salicornia dolichostachya* (Εικ. 5.2). Και τα τρία αυτά φυτά είναι εδώδιμα και χρησιμοποιούνται είτε ως σαλατικά είτε για την Παρασκευή τουρσιών (Kunkel, 1984; Sturtevant, 1972) ενώ το *P. coronopus*

χρησιμοποιείται και για την επούλωση πληγών και ως μαλακτικό δέρματος (Ben Sassi et al., 2008). Η υδροπονική εγκατάσταση συνίστατο σε υδροπονικές δεξαμενές που τροφοδοτούν νερό από συστήματα RAS με ρυθμό ροής  $0,15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  από τις 8 π.μ. έως τις 8 μ.μ. ( $1,8 \text{ m}^3 \text{ ημέρα}^{-1}$ ). Αυτός ο ρυθμός ροής είναι σημαντικά μικρότερος από τη ροή που θα συνέβαινε μέσω ενός βιολογικού φίλτρου νιτροποίησης ( $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  για 24 ώρες την ημέρα ή  $360 \text{ m}^3 \text{ ημέρα}^{-1}$ ).



Εικόνα 5.1: Λαυράκι (*Dicentrarchus labrax*). ((Πηγή: Φωτογραφίες από wikipedia.com του Hans Hillewaert, διανομή με άδεια Creative Commons).



Εικόνα 5.2: Α) *Tripolium pannonicum*, Β) *Plantago coronopus* Γ) *Salicornia dolichostachya*. (Πηγή: Φωτογραφίες από wikipedia.com των Α) Evelyn Simak, Β) Kurt Stüber Γ) Hugues Tinguy, διανομή με άδεια Creative Commons.)

Κάθε είδος φυτού αναπτύχθηκε με παρόμοιο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης (Specific Growth Rate, SGR) που ήταν ίσος με  $9\% - 9,9\% \text{ ημέρα}^{-1}$ . Μετά την πειραματική περίοδο των 35 ημερών, τόσο το *T. pannonicum* όσο και το *S. dolichostachya* είχαν

φτάσει σε εμπορεύσιμο μέγεθος με μέσο βάρος βλαστών 25 g και 60 g αντίστοιχα. Οι υψηλές θερμοκρασίες αέρα στο θερμοκήπιο στην αρχή του πειράματος μπορεί να περιορίσαν την ανάπτυξη των φυτών *P. coronopus* (μέσο βάρος βλαστών 17 g). Η συνολική παραγωγή φυτικού υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος ανήλθε σε 6 kg, 4 kg και 13 kg για τα *T. rannonicum*, *P. coronopus* και *S. dolichostachya*, αντίστοιχα. Τα φυτά ενσωμάτωσαν συνολικά 46 g N και 7 g P κατά τη διάρκεια της δοκιμής 35 ημερών, ισοδύναμο με 9% N και 10% P από την ποσότητα που εισήχθη με την τροφή ψαριών. Αυτό το σύστημα, εκτιμήθηκε ότι 189 g N προέκυψαν από τα απεκκρίματα των ψαριών και εάν συμπεριλαμβανόταν μόνο το αλόφυτο με την καλύτερη απόδοση (*S. dolichostachya*), θα χρειαζόταν 1128 φυτά σε μια υδροπονική περιοχή 14,4 m<sup>2</sup> για να αφαιρεθεί όλο το N απέκκρισης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής 35 ημερών, το λαβράκι αυξήθηκε από 32 g σε 54 g κατά μέσο όρο, με SGR 1,5% ημέρα<sup>-1</sup> και παρουσίασε FCR 0,93. Το βρώσιμο μέρος του φυτικού υλικού δοκιμάστηκε και βρέθηκε ότι είναι μικροβιακά ασφαλές και εγκεκριμένο για ανθρώπινη κατανάλωση (Waller et al., 2015).

Οι Vlahos et al. (2019) μελέτησαν την αύξηση της τσιπούρας (*Sparus aurata*) (Εικ. 5.3) και του κρίταμου (*Crithmum maritimum*) (Εικ. 5.4) σε ενυδρειοπνικά συστήματα με δύο διαφορετικές αλατότητες 8 και 20 ppt. Το κρίταμο είναι ένα ευρέως διαδεδομένο φυτό στις παράκτιες περιοχές της μεσογείου με πολλά θρεπτικά συστατικά και βιταμίνη C που χρησιμοποιείται είτε για σαλατικό είτε για τουρσί (Cunsolo et al., 1993). Ψάρια και φυτά μεγάλωναν στις ίδιες δεξαμενές ταυτόχρονα με τις δεξαμενές να περιέχουν 26 ψάρια η κάθε μία και 6 φυτά. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 156 ψάρια και 36 φυτά, σε δύο μεταχειρίσεις, αλατότητα 8 και 20 ppt και σε 3 επαναλήψεις. Το ποσοστό επιβίωσης των ψαριών και στις δύο αλατότητες ήταν υψηλό, 99% και 97% για 8 και 20 ppt αντίστοιχα και οι ρυθμοί ανάπτυξης τους και το τελικό βάρος, δεν παρουσίαζε αλλαγές. Το πείραμα κράτησε 102 ημέρες. Στα φυτά δεν παρατηρήθηκε θνησιμότητα κανενός φυτού αλλά παρουσίασαν διαφορές στο τελικό ύψος, την βιομάζα φύλλων και τους συνολικούς βλαστούς, με τα φυτά που αναπτύσσονταν στα 8 ppt να έχουν μεγαλύτερες επιδόσεις.



Εικόνα 5.3: Τσιπούρα, *Sparus aurata*. (Πηγή: Φωτογραφία από wikipedia.com του Roberto Pillon, διανομή με άδεια Creative Commons.)



Εικόνα 5.4: Κρίταμο, *Crithmum maritimum*. (Πηγή: Φωτογραφία από t53vorini-gr.blogspot.com)

Το πείραμα έδειξε ότι η συγκαλλιέργεια τσιπούρας και κρίταμου είναι εφικτή σε δεξαμενές εκτός θάλασσας και παρουσιάζει οικολογικά και οικονομικά οφέλη για τους παραγωγούς (Vlahos et al., 2019).

Οι Voxman et al. (2017) αξιολόγησαν την ικανότητα επεξεργασίας νερού και τις απαιτήσεις παραγωγής δύο αλόφυτων, των *Sesuvium portulacastrum* και *Batis*

*maritima* (Εικ. 5.5), όταν καλλιεργήθηκαν σε εσωτερικό σύστημα ανακυκλοφορίας SA με το ψάρι «πλατύ» (*Xiphophorus sp.*) (Εικ. 5.6). Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές τριάντα ημερών με ελάχιστη έως μέγιστη αλατότητα από 13,1 ‰ έως 17,1 ‰. Η πρώτη δοκιμή αξιολόγησε τα ποσοστά απομάκρυνσης των νιτρικών αλάτων, με το *Sesuvium portulacastrum* παρόν και χωρίς φυτά, και σε συνδυασμό με δύο διαφορετικά μέσα στήριξης φυτών, ινών καρύδας και διογκωμένου πηλού. Διαπίστωσαν ότι η παρουσία φυτών συνέβαλε σημαντικά στην απομάκρυνση των νιτρικών αλάτων, έτσι ώστε οι μέσες συγκεντρώσεις νιτρικών να πέσουν στα  $10,1 \pm 5,4$  mg / L στα πειραματικά τεμάχια με φυτά σε σύγκριση με τα  $12,1 \pm 6,1$  mg / L στις μη φυτεμένα πειραματικά τεμάχια. Η χρήση ινών καρύδας ως μέσου στήριξης για τα φυτά οδήγησε σε σημαντικά χαμηλότερο μέσο επίπεδο νιτρικών στο νερό ( $9,78 \pm 5,4$  mg / L) σε σύγκριση με την διογκωμένη άργιλο ( $12,4 \pm 6$  mg / L). Η δεύτερη δοκιμή αξιολόγησε τον αντίκτυπο του ρυθμού ροής, των φυτικών ειδών και της πυκνότητας των φυτών στην πρόσληψη αζώτου από το νερό της δεξαμενής ψαριών. Ο ρυθμός πρόσληψης αζώτου για το όσο και για το *Sesuvium portulacastrum* όσο και για το *Batis maritima* χωριστά) υπό τις ακόλουθες συνθήκες:

- α) Υψηλή ροή ( $1 \text{ L min}^{-1}$ ) και υψηλή πυκνότητα (24 φυτά),
- β) Υψηλή ροή και χαμηλή πυκνότητα (12 φυτά),
- γ) χαμηλή ταχύτητα ροής ( $0,5 \text{ L min}^{-1}$ ) και υψηλή πυκνότητα,
- δ) χαμηλός ρυθμός ροής και χαμηλή πυκνότητα.

Διαπιστώθηκε ότι η συνθήκη χαμηλού ρυθμού ροής / χαμηλής πυκνότητας φυτών με το *Batis maritima* είχε το μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης αζώτου, κυμαινόμενο από 25% έως 172%. Ωστόσο, η μέση απόδοση για τα ψάρια ήταν  $0,53 \pm 0,09 \text{ kg m}^{-2}$  και  $0,32 \pm 0,06 \text{ kg m}^{-2}$  για το *Sesuvium portulacastrum* και το *Batis maritima*, αντίστοιχα, ήταν χαμηλή και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη χρήση αυτών των ειδών σε μονάδες ενυδρείοπονίας (Boxman et al., 2017).



Εικόνα 5.5: A) *Sesuvium portulacastrum*, B) *Batis maritima* (Πηγή: Φωτογραφίες από wikipedia.com των A) David Eickhoff, B) Άγνωστου, διανομή με άδεια Creative Commons.)



Εικόνα 5.6: Πλατύ, *Xiphophorus sp.* (Πηγή: Φωτογραφία από wikipedia.com του χρήστη Marrabbio2, διανομή με άδεια Creative Commons.)



Εικόνα 5.7: Αρμυρήθρα, *Salicornia europaea* (Πηγή: Φωτογραφία από wikimedia.org του χρήστη Marco Schmidt, διανομή με άδεια Creative Commons.)

Ο Gunning, (2016) έδειξε ότι η αρμυρήθρα (*Salicornia europaea*) (Εικ. 5.7) που καλλιεργήθηκε σε μια αεροπονική μονάδα με υγρά λύματα από υδατοκαλλιέργεια στρειδιών αναπτύχθηκε με μεγάλη επιτυχία σε χαμηλές έως μέτριες αλατότητες, δηλαδή, σε ένα μείγμα γλυκού νερού 33% και θαλασσινού νερού 66% και μείωσε τα επίπεδα αμμωνίας, νιτρικών, νιτρικών και φωσφορικών αλάτων στα λύματα (Gunning, 2016). Δεδομένου ότι το επίπεδο των θρεπτικών ουσιών στα λύματα ήταν πολύ χαμηλό στην αρχή, η αλλαγή που προέκυψε ήταν μικρή. Ωστόσο όσο περνούσαν οι εβδομάδες, τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών στα λύματα των στρειδιών ήταν πολύ υψηλότερα από ότι στην αρχή. Ωστόσο, μετά από μία εβδομάδα στους αεροπονικούς θαλάμους, η αμμωνία, το νιτρικό άλας και το νιτρικό άλας είχαν μειωθεί. Το επίπεδο των φωσφορικών αλάτων μετά από μία εβδομάδα ήταν πιο μεταβλητό, μειώθηκε μετά από μία εβδομάδα στους αεροπονικούς θαλάμους στο 50% των περιπτώσεων.

Οι Kong και Zheng (2014) μεγάλωσαν επιτυχώς υδροπονικά το *Salicornia bigelovii* (Εικ. 5.8) (σε δίσκους από Styrofoam να επιπλέουν σε θρεπτικό διάλυμα) και διαπίστωσαν ότι μια εμπορεύσιμη απόδοση  $1,69 \pm 0,21 \text{ kg m}^{-2}$  μπορεί να επιτευχθεί όταν καλλιεργηθεί σε υψηλές αλατότητες (200 mM NaCl) σε αντίθεση με την



απόδοση που επιτεύχθηκε σε μέτριες αλατότητες (6, 8 και 10 mM NaCl) (Kong and Zheng, 2014).



Εικόνα 5.8: Αρμυρήθρα, *Salicornia bigelovii* (Πηγή: Φωτογραφία από Speranza et al., (2015) διανομή με άδεια Creative Commons.)

Το *Salicornia bigelovii* είναι ένα αλόφυτο που μπορεί να αναπτυχθεί σε συνθήκες υψηλής αλατότητας. Για να αξιολογηθεί το δυναμικό παραγωγής του *S. bigelovii* σε υδροπονικά συστήματα ως λαχανικό σε μέτριες συγκεντρώσεις NaCl, τα φυτά αναπτύχθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα με 6, 8 και 10 mM NaCl, και με 200 mM NaCl ως μάρτυρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φυτά είχαν μειωμένο μήκος κυρίως βλαστού, πλάτος φυλλοστοιοβάδας, διάμετρο στελέχους και μήκος συστήματος ρίζας στα διαλύματα 6 έως 10 mM NaCl σε σύγκριση με εκείνα στα 200 mM. Επίσης, η αύξηση του φρέσκου βάρους, τα φρέσκα και ξηρά βάρη των μεμονωμένων φυτών, η εμπορεύσιμη απόδοση και η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού των φυτών που αναπτύχθηκαν σε διαλύματα με 6 έως 10 mM NaCl ήταν σημαντικά χαμηλότερες από αυτές που αναπτύχθηκαν σε 200 mM. Σε σχέση με τα μειωμένα χαρακτηριστικά ανάπτυξης, σημειώθηκαν αξιοσημείωτες μειώσεις της πρόσληψης νατρίου από τα φυτά σε 6 έως 10 έναντι 200 mM NaCl. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το *S. bigelovii* δεν είναι καλός υποψήφιος για υδροπονική παραγωγή ως

λαχανικό με μέτρια αλατότητα NaCl που προκύπτει από μειωμένες ιδιότητες ανάπτυξης, οι οποίες πιθανώς σχετίζονται με μειωμένη πρόσληψη νατρίου. Αντιθέτως είναι πολύ καλός υποψήφιος σε συστήματα ενυδραιοπονίας με θαλασσινό νερό.

Σε εργασία που πραγματοποιήθηκε από τους Buhmann et al. (2015) σχετικά με τη χρήση αλόφυτων (6 διαφορετικά είδη) ως βιολογικού φίλτρου για πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά αλατούχο νερό διαπιστώθηκε ότι η χρήση ενός συστήματος υδροπονικής καλλιέργειας είναι πιο κατάλληλη σε σχέση με την καλλιέργεια σε άμμο ή άργιλο σε ελεγχόμενες συνθήκες. Μετά από μια δοκιμή 5 εβδομάδων, αποδείχθηκε ότι τουλάχιστον  $10 \text{ mg L}^{-1}$  νιτρικών και  $0,3 \text{ mg L}^{-1}$  φωσφορικών αλάτων ήταν απαραίτητα για λογική παραγωγή βιομάζας, αλλά η υψηλότερη συγκέντρωση Γφωσφορικών προήγαγε την πρόσληψή τους. Η προσθήκη σιδήρου σε χηλική μορφή ήταν επίσης απαραίτητη για την ανάπτυξη υγιούς φυτικής βιομάζας, ενώ, η προσθήκη μαγγανίου ήταν ευεργετική αλλά όχι απαραίτητη. Οι Buhmann et al., (2015) διαπίστωσαν ότι όλα τα δοκιμασμένα είδη έχουν τη δυνατότητα να χρησιμεύσουν ως βιολογικά φίλτρα, είναι παραγωγικά, και έχουν δυνατότητα ενσωμάτωσης σε συστήματα SA. Τα είδη που μελετήθηκαν σε αυτή τη δοκιμή ήταν: *T. rannonicum* (Εικ. 2Α), *Plantago coronopus* (Εικ. 5.2Β), *Salicornia dolichostachya* (Εικ. 5.2Γ), *Atriplex portulacoïdes* (Εικ. 5.9Α), *Lepidium latifolium* (Εικ. 5.9Β), και *Atriplex halimus* (Εικ. 5.9Γ) (Buhmann et al., 2015). Καθώς πολλά αλόφυτα έχουν μειωμένα επίπεδα ανάπτυξης σε υψηλή αλατότητα, η ενσωμάτωση συγκαλλιέργειας αλγών στα SA είναι μια πιθανή λύση για συστήματα που χρησιμοποιούν επίπεδα αλατότητας θαλασσινού νερού (Lymbery et al., 2006; Wilson, 2005).



Εικόνα 5.9: Α) *Atriplex portulacoides*, Β) *Lepidium latifolium*, Γ) *Atriplex halimus*. (Πηγή: Φωτογραφίες από wikimedia.org των Α) P.Shannon, Β) Michael Becker Γ) Krzysztof Ziarnek, διανομή με άδεια Creative Commons.)

## 5.2 Συνδυασμένη με γλυκόφυτα

Εναλλακτικά, οι καλλιέργειες που συνήθως ταξινομούνται ως γλυκόφυτα (το αντίθετο από τα αλόφυτα), όπως η κοινή ντομάτα (*Lycopersicon esculentum*), τα ντοματίνια (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme*) και ο βασιλικός (*Ocimum basilicum*) μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά καλά επίπεδα παραγωγής σε αλατότητα έως και 4 g / L και συχνά αναφέρεται ότι έχουν χαμηλά - μέτρια επίπεδα ανοχής σε άλατα ενώ, δεν πρέπει να συγχέονται με τα αλόφυτα, τα οποία είναι ανθεκτικά σε υψηλές αλατότητες. Άλλες καλλιέργειες που είναι ανθεκτικές σε χαμηλές έως μέτριες αλατότητες είναι οι: γογγύλια, ραπανάκι, μαρούλι, γλυκοπατάτα, κουκιά, καλαμπόκι, λάχανο, σπανάκι, σπαράγγια, τεύτλα, κολοκύθα, μπρόκολο και αγγούρι (Dufault et al., 2001; Dufault and Korkmaz, 2000).

Ο Dufault et al. (2001) και οι Dufault και ο Korkmaz (2000) πειραματίστηκαν με τα βιοστερεά γαρίδας (κόπρανα γαρίδας και αποσυντιθέμενη τροφή) ως λίπασμα για την παραγωγή μπρόκολου (*Brassica oleracea italica*) (Εικ. 5.10B) και πιπεριάς (*Capsicum annuum*) (Εικ. 5.10A) αντίστοιχα. Και στις δύο δοκιμές, λιπάνθηκαν οι καλλιέργειες με, α) μόνο βιοστερεά, β) σε συνδυασμό με λιπάσματα αργής αποδέσμευσης, και γ) μόνο με λιπάσματα αργής αποδέσμευσης, και διαπίστωσαν ότι μόνο τα βιοστερεά δεν μεγιστοποιούσαν τις αποδόσεις.



Εικόνα 5.10: A) *Capsicum annuum*, B) *Brassica oleracea italica*. (Πηγή: Φωτογραφίες από [www.gardeningknowhow.com](http://www.gardeningknowhow.com) των A) Caroline Bloomfield, B) Laura Miller.

Για το πείραμα του μπρόκολου, το σύστημα καλλιέργειας που αύξησε την απόδοση συνδύαζε εννιακόσια κιλά βιοστερεών ανά στρέμμα με 7,5 kg λιπάσματος ανά στρέμμα, παρέχοντας ένα συνολικό ποσό 26,3, 11,6, 9,9 και 9,9 kg / στρέμμα N, P, K και Na αντίστοιχα . Για το πείραμα της πιπεριάς, το σύστημα καλλιέργειας που αύξησε την απόδοση περιλάμβανε τα υψηλότερα ποσοστά τόσο σε βιοστερεά όσο και σε λίπασμα, τα οποία απέδωσαν συνολικά 63,3, 25,3 και 30,3 kg / στρέμμα N, P και K αντίστοιχα. Και στις δύο δοκιμές, ωστόσο, σημειώθηκε ότι τα βιοστερεά περιείχαν υψηλά επίπεδα νατρίου και μια αύξηση της συγκέντρωσης άλατος στο έδαφος θα μπορούσε να καταστέλλει την ανάπτυξη ορισμένων καλλιεργειών, ειδικά εκείνων που είναι ευαίσθητα στο αλάτι (π.χ. καρότα, φράουλες και κρεμμύδια). Για το λόγο αυτό, οι Dufault και Korkmaz (2000) προτείνουν μια σειρά καλλιεργητικών βημάτων κατά τη χρήση των βιοστερεών, για τη μείωση του κινδύνου βλάβης που μπορεί να προκαλέσει η αλατότητα. Συμβουλεύουν να τροποποιήσουν την αλατότητα των βιοστερεών με: αραίωση, ανάμειξη με άλλες οργανικές ύλες, έκπλυση με νερό άρδευσης ή με χρήση των βιοστερεών σε εδάφη με υψηλή ρυθμιστική ικανότητα (Dufault et al., 2001; Dufault and Korkmaz, 2000). Αν και οι παραπάνω μελέτες δεν χρησιμοποίησαν κάποια τεχνική μείωσης της αλατότητας, αφορούσαν φυτά που καλλιεργούνται συνήθως σε συστήματα ενυδρείονιας γλυκού νερού. Επομένως, λόγω των επιπέδων ανοχής αλατότητάς τους, έχουν τεράστιο δυναμικό ως υποψήφια είδη για χρήση σε συστήματα αλμυρής ενυδρείονιας που χρησιμοποιούν χαμηλές έως μεσαίες αλατότητες.



Εικόνα 5.11: Παντζάρι, *Beta vulgaris* var. *circa* (Πηγή: Φωτογραφία του Jason Ingram από [www.gardenersworld.com](http://www.gardenersworld.com))

Σε άλλη μελέτη οι Nozzi et al. (2016) μελέτησαν την συγκαλλιέργεια παντζαριού (*Beta vulgaris* var. *circa*) (Εικ. 5.11) με λαυράκι (*Dicentrarchus labrax*) (Εικ. 5.1) σε δύο ενυδρειοπονικά συστήματα, ένα με γλυκό νερό και ένα με αλμυρό νερό με αλατότητα 20ppt. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο αλμυρό νερό η συγκέντρωση νιτρικών και φωσφορικών ιόντων ήταν μεγαλύτερη, απόδειξη του ότι η αυξημένη αλατότητα εμποδίζει τα φυτά να προσλάβουν αυτά τα στοιχεία. Επίσης τα φυτά στην αυξημένη αλατότητα ήταν σημαντικά μικρότερα, με περισσότερες και μεγαλύτερες πλευρικές ρίζες, λόγω του εμποδίου που παρουσιάζει το αλάτι στην πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων. Τα φυτά επίσης παρουσίασαν αυξημένο επίπεδο λιπιδίων. Όσον αφορά τα ψάρια και συγκεκριμένα τα σωματικά χαρακτηριστικά όπως το βάρος του κρέατός, του δέρματος και τα ποσοστά του βάρους των οργάνων τους δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά μεταξύ των δύο νερών. Η μόνη διαφορά που παρατηρήθηκε ήταν στο χρώμα του δέρματος όπου τα ψάρια στο αλμυρό νερό ήταν πιο κίτρινα. Επίσης στην σύσταση και ποσότητα του λίπους δεν υπήρξαν διαφορές στα μονο-ακόρεστα και πολύ-ακόρεστα λιπαρά πάρα μόνο στα κορεσμένα που ήταν λιγότερα ψάρια του γλυκού νερού (Nozzi et al., 2016). Συμπερασματικά η εκτροφή ψαριών έδωσε καλά αποτελέσματα στην παραγωγή τους αλλά το συγκεκριμένο φυτό δεν απέδωσε τα αναμενόμενα. Ένα τέτοιο σύστημα εκτροφής θα έβρισκε ανταπόκριση σε μέρη με

περιορισμένους πόρους γλυκού νερού σε συνδυασμό όμως με κάποιο άλλο φυτό που να αντέχει την αυξημένη αλατότητα.

### 5.3 Συνδυασμένη με φύκια

Αν και η έννοια του «saltwater aquaponics (SA)» είναι πολύ νέα, ένα ενδιαφέρον για την ολοκληρωμένη θαλάσσια καλλιέργεια με βάση τα φύκια άρχισε να εμφανίζεται στη δεκαετία του 1970, ξεκινώντας από εργαστηριακή κλίμακα και



στη συνέχεια επεκτάθηκε σε εξωτερικές δοκιμές πιλοτικής κλίμακας. Σε μερικές από τις πρώτες ποσοτικές μελέτες, οι Haines (1976) και Langton et al. (1977) μελέτησαν την ανάπτυξη του κόκκινου φυκιού, *Hypnea musciformis* (Εικ. 5.12), που καλλιεργήθηκε σε δεξαμενές με λύματα καλλιέργειας οστρακοειδών (Haines, 1976; Langton et al., 1977). Ο Haines (1976) διαπίστωσε ότι το *H. musciformis* που αναπτύχθηκε με τα απόβλητα από τη καλλιέργεια οστρακοειδών αυξήθηκε περίπου 5 φορές ταχύτερα από την ανάπτυξη σε φυσικό, θαλασσινό νερό από βάθος, και περίπου τρεις φορές ταχύτερα από ό,τι σε επιφανειακό θαλασσινό νερό (Haines, 1976). Οι Langton et al. (1977) μεγάλωσαν επίσης το *H. musciformis* με νερό από οστρακόδερμα και διαπίστωσε ότι είχε ρυθμό πρόσληψης αμμωνιακού-N έως και 70% (Langton et al., 1977). Από τη δεκαετία του 1980, ο αριθμός των μελετών που ανέφεραν τη χρήση φυκών για ένταξη σε συστήματα υδατοκαλλιέργειας στην ξηρά αυξήθηκε, με το *Ulva* spp. και το *Gracilaria* spp. είναι το πιο συχνά μελετημένα είδη (Granada et al., 2016; Neori et al., 2004; Troell et al., 2003).

Εικόνα 5.12: *Hypnea musciformis* (Πηγή: Φωτογραφία του J. Smith από [www.hawaii.edu](http://www.hawaii.edu))

Σχετικά με τα είδη *Hydrlea*, έχουν χρησιμοποιηθεί για τροφή και για την παραγωγή φυκοκολλοειδών (Abbott et. al, 1997). Το φυτοκολλοειδές καραγεννάνη είναι μια κόκκινη γαλακτάνη φυκών που χρησιμοποιείται ως παράγοντας υφής, η πυκτικός παράγοντας σε τρόφιμα κυρίως, με ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση (Reis et al., 2008). Τα συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων διαφόρων ειδών *Hydrlea*, συμπεριλαμβανομένου του *H. musciformis*, βρέθηκε να περιλαμβάνουν Κάπα καραγεννάνες και έχει αξιοποιηθεί ως εμπορική πηγή Κάπα καραγεννάνης, τόσο στη Βραζιλία όσο και στην (Faccini and Berchez, 2000; Ganesan et al., 2006).

Οι Jimenez del Río et al. (1996) καλλιέργησαν το *Ulva rigida* (Εικ. 5.13) σε δεξαμενές 750 λίτρων που τροφοδοτούνταν με λύματα από μια εμπορική θαλάσσια δεξαμενή ψαριών που εκτρέφει 40 μετρικούς τόνους (Mt) τσιπούρας (*Sparus aurata*) (Εικ. 5.3), και καθόρισε ότι οι μέγιστες αποδόσεις *U. rigida* (40 g ξηρού βάρους (DW) m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup>) ελήφθησαν με πυκνότητα φυκιών 2,5 g νωπού βάρους L<sup>-1</sup> και ρυθμό εισροής διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN) 1,77 g DIN m<sup>-2</sup>.



Εικόνα 5.13: *Ulva rigida* (Πηγή: Φωτογραφία του Roberto Pillon από [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org))

Η μέση ετήσια απόδοση αφαίρεσης DIN κάτω από αυτές τις παραμέτρους ήταν



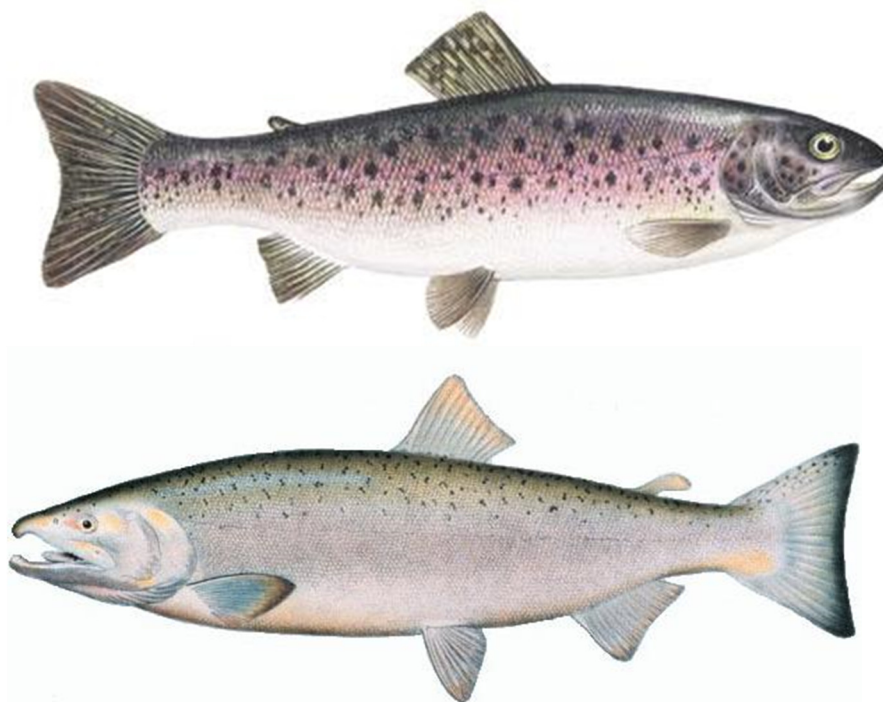
2 g DIN m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup> και υπολογίστηκε ότι θα χρειαστούν 153 m<sup>2</sup> επιφάνειας δεξαμενής με *U. rigida* για την ανάκτηση του 100% του DIN που παράγεται από 1 Mt ψαριών (del Río et al., 1996).

Οι Buschmann et al. (1996) καλλιέργησαν το *Gracilaria chilensis* (Εικ. 5.14) σε τέσσερις δεξαμενές 2.500 λίτρων με λύματα από δεξαμενές καλλιέργειας σολομού (*Oncorhynchus kisutch*) (Εικ. 5.15) και ιριδίζουσας πέστροφας (*Oncorhynchus mykiss*) (Εικ. 5.16). Στο υψηλότερο σημείο της, η παραγωγή του *G. chilensis* έφτασε τα 48,9 kg m<sup>-2</sup> έτος<sup>-1</sup> και μπορεί να αφαιρέσει το 50% των διαλυμένων αμμωνιακών κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αυξάνοντας την αφαίρεση σε 90% –95% την άνοιξη. Ο Buschmann et al. (1996) πραγματοποίησε επίσης ένα μοντέλο ανάλυσης εισοδήματος και υπολόγισε ότι η συγκομιδή του *G. chilensis* μπορεί να προσφέρει πρόσθετα συνολικά έσοδα άνω των 60.000 \$, που αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% του συνολικού εισοδήματος (Buschmann et al., 1996).

Εικόνα 5.14: *Gracilaria chilensis* (Πηγή: Φωτογραφία του χρήστη Emoody26 από [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org))



Εικόνα 5.15: Ασημένιος σολωμός, *Oncorhynchus kisutch* (Πηγή: Φωτογραφία άγνωστου από [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org))



[www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org))

Εικόνα 5.16: Ιριδίζουσα πέστροφα, *Oncorhynchus mykiss* (Πηγή: Φωτογραφία από [ec.europa.eu/fisheries/marine\\_species/farmed\\_fish\\_and\\_shellfish/](http://ec.europa.eu/fisheries/marine_species/farmed_fish_and_shellfish/))

Ο Chow et al. (2001) χρησιμοποίησε το *G. chilensis* ως βιολογικό φίλτρο στην αποβολή των λυμάτων από δεξαμενές με εκτροφή *Isacia conceptionis* (Εικ. 5.17),

στρείδια (*Crassostrea gigas*) (Εικ. 5.18) και αχινούς (*Loxechinus albus*) (Εικ. 5.19) και συνέκρινε την παραγωγικότητά του και το σχετικό ρυθμό ανάπτυξης (RGR) του *G. chilensis* σε σχέση με αυτό που καλλιεργείται με θαλασσινό νερό. Το *G. chilensis* καλλιεργήθηκε σε δεξαμενές 200 L (εμβαδόν 0,5 m<sup>2</sup>). Διαπιστώθηκε ότι η παραγωγικότητα ήταν υψηλότερη στις δεξαμενές του *G. chilensis* που τροφοδοτούνταν με τα λύματα ψαριών, με το ρυθμό αύξησης νωπού βάρους να είναι 51,2 g m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup>, σε σύγκριση με 23,9, 16,2 και 18,6 g m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup> στις δεξαμενές με *G. chilensis* που τροφοδοτούνταν με εκροή στρειδιών, εκροές αχινών και θαλασσινό νερό (μάρτυρας), αντίστοιχα (Chow et al., 2001).

Εικόνα 5.17: *Isacia conceptionis* (Πηγή: Φωτογραφία από <https://www.fishbase.de>)



Εικόνα 5.18: *Crassostrea gigas* (Πηγή: Φωτογραφία του Natural History Museum Rotterdam από <http://www.marinespecies.org>)

Ο Abreu et al. (2011) χρησιμοποίησε 12, 1200 L (συνολικό εμβαδόν 18 m<sup>2</sup>) δεξαμενές με *G. vermiculophylla* σε μια εμπορική, εντατική φάρμα υδατοκαλλιέργειας, σε ξηρά, που παρήγαγε 40 τόνους καλκάνι (*Scophthalmus rhombus*) (Εικ. 5.19), 5 τόνους λαβράκι (*D. labrax*) (Εικ. 5.1), και εξέτρεφε 500.000 γόνους γλώσσας (*Solea senegalensis*) (Εικ. 5.20). Το *G.vermiculophylla* αναπτύχθηκε καλύτερα σε πυκνότητα 3 kg νωπού βάρους m<sup>-2</sup> και ρυθμό ανανέωσης νερού 200 L h<sup>-1</sup>, παράγοντας 0,7 ± 0,05 kg DW m<sup>-2</sup> μήνα<sup>-1</sup>, ενώ αφαιρούσε 40,54 ± 2,02 g m<sup>-2</sup> μήνα<sup>-1</sup> αζώτου. Υπολόγισαν ότι σε ένα έτος, αυτό το σύστημα θα μπορούσε να παράγει περίπου 156 kg (DW) φυκιών και αυτό το επίπεδο βιομάζας θα απομακρύνει 8,8 kg αζώτου. Για να επιτευχθεί αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αζώτου 100%, υπολογίστηκε ότι η έκταση της δεξαμενής θα πρέπει να αυξηθεί στα 3,6 στρέμματα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνθήκες καλλιέργειας διατηρούνται οι ίδιες (δηλ. πυκνότητα αποθήκευσης 3 kg WW m<sup>-2</sup>, 1200 L δεξαμενές με εμβαδόν 1,5 m<sup>-2</sup>, και ρυθμό ανανέωσης νερού 200 L h<sup>-1</sup>) (Abreu et al., 2011). Όπως μπορεί να φανεί από μερικές από τις παραπάνω μελέτες, τα φύκια όχι μόνο αναπτύσσονται καλά όταν καλλιεργούνται με απόβλητα από θαλασσοκαλλιέργειες, αλλά μπορούν να αναπτυχθούν καλύτερα από τα φύκια που καλλιεργούνται με θαλασσινό νερό ή θαλασσινό νερό εμπλουτισμένο με λιπάσματα.



Εικόνα 5.19: Καλκάνι, *Scophthalmus rhombus* (Πηγή: Φωτογραφία από <https://mare.istc.cnr.it/fisheriesv2/species>)



Εικόνα 5.20: Γλώσσα, *Solea senegalensis* (Πηγή: Φωτογραφία από <https://www.fishbase.de>)

Οι Vandermeulen και Gordin (1990) διαπίστωσαν ότι το *Ulva lactuca* που καλλιεργήθηκε με εντατική ροή λυμάτων μεγάλωσε με γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης άνω των 55 g ξηρό βάρος (DW) ημέρα<sup>-1</sup> ανά 600 L και απομακρύνθηκε αποτελεσματικά έως και το 85% των αμμωνιακών από τα λύματα (Vandermeulen and Gordin, 1990). Οι Neori et al. (1991) καλλιέργησαν το *U. lactuca* σε λύματα από δεξαμενές ψαριών εντατικής καλλιέργειας και διαπίστωσαν ότι ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης και η απόδοση ήταν υψηλότεροι σε σχέση με το *U. lactuca* που αναπτύχθηκε σε εμπλουτισμένο φρέσκο θαλασσινό νερό. Στην καλλιέργεια με λύματα, η μέγιστη απόδοση (DW) που επιτεύχθηκε ήταν 55 g m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup> και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ήταν 18% ημέρα<sup>-1</sup>. Οι αποδόσεις που επιτεύχθηκαν μέσω της καλλιέργειας λυμάτων ήταν έως και 38% υψηλότερες από αυτές του εμπλουτισμένου φρέσκου θαλασσινού νερού. Μέσω της διεξαγωγής αυτής της έρευνας, οι Neori et al. (1991) πρότειναν ότι, για υψηλή απόδοση και περιεκτικότητα σε άζωτο, το *U. lactuca* πρέπει να διατηρείται σε πυκνότητα 1-2 kg m<sup>-2</sup> και η ροή αμμωνιακών περίπου 0,5 moles m<sup>-2</sup> ημέρα<sup>-1</sup> (Neori et al., 1991).

## 6. Συμπεράσματα

Η ενυδραιοπονία αλμυρού νερού έχει γίνει μια από τις πιο ελπιδοφόρες οδούς για την αύξηση της παραγωγής θαλασσινών ωστόσο, έρχεται με μια σειρά πιθανών αρνητικών επιπτώσεων (απόβλητα, παρουσία ρύπων, κατανάλωση νερού, πιθανή διαφυγή ψαριών εκτροφής, μετάδοση παρασίτων και ασθενειών).

Οι λειτουργίες των συστημάτων RAS προσφέρουν μια σειρά λύσεων σε αυτά τα προβλήματα. Λόγω της επίγεια εγκατάστασης και της ανακυκλοφορίας νερού, η πιθανότητα διαφυγής ψαριών είναι εξαιρετικά χαμηλή και το 90% -99% του νερού ανακυκλώνεται. Μπορούν να εγκατασταθούν σε γη ακατάλληλη για άλλες μεθόδους παραγωγής τροφίμων, σε αστικές περιοχές ή κοντά σε αγορές. Οι μολύνσεις, τα παράσιτα και οι ασθένειες μπορούν να απομακρυνθούν ή να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά μέσω αποστείρωσης του επαναχρησιμοποιημένου νερού και όλα τα απόβλητα μπορούν να συγκεντρωθούν και να υποστούν επεξεργασία ή να χρησιμοποιηθούν ως εισροή σε άλλα συστήματα παραγωγής, π.χ. ως λιπάσματα σε καλλιέργειες. Τα RAS μπορούν επίσης να βρίσκονται μακριά από υδάτινα σώματα, μειώνοντας περαιτέρω τις δυνατότητες διαφυγής ψαριών στο περιβάλλον και επιτρέποντας την καλλιέργεια ψαριών ταχύτερα αναπτυσσόμενων που έχουν εκτραφεί επιλεκτικά χωρίς την ανησυχία για πιθανή βιολογική εισβολή. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, τα RAS έχουν σημαντικό μειονέκτημα το υψηλό κόστος των υποδομών, της εργασίας, της διαχείρισης και της ενέργειας. Για το λόγο αυτό, τα RAS δείχνουν περισσότερο υποσχόμενα για την παραγωγή ειδών υψηλής αξίας.

Η έννοια της ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (IMTA) στοχεύει στην αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων της υδατοκαλλιέργειας αλμυρού νερού μέσω μιας προσέγγισης που βασίζεται στο σύστημα, όπου είδη από διαφορετικά τροφικά επίπεδα χρησιμοποιούν τα απόβλητα από την τροφή μιας υδατοκαλλιέργειας.

Η ενυδραιοπονία αλμυρού νερού είναι μια περίπτωση IMTA σε έδαφος, που συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια αλμυρού νερού με την υδροπονική καλλιέργεια ανθεκτικών στο αλάτι ή υδρόβιων φυτών. Αυτά τα συστήματα συνήθως λειτουργούν με ελεγχόμενο τρόπο (π.χ., ελεγχόμενοι ρυθμοί ροής, εγκατάσταση σε θερμοκήπια),

χρησιμοποιούν ανακυκλοφορία νερού και έχουν βιολογικά και / ή μηχανικά βιολογικά φίλτρα, παρέχοντας μια καλύτερη ευκαιρία για εντατική καλλιέργεια, επαναχρησιμοποίηση νερού, μειωμένα λύματα και παραγωγή σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής φυτών και ψαριών. Οι βελτιώσεις στην ποιότητα του νερού μειώνουν επίσης τις πιθανότητες εμφάνισης ασθενειών και, στη συνέχεια, την ανάγκη χρήσης αντιβιοτικών. Λόγω των ευέλικτων επιλογών διαμόρφωσης των ενυδρειοπονικών συστημάτων και των χαμηλών απαιτήσεων νερού, μπορούν να βρίσκονται σε μια ποικιλία περιοχών από άνυδρες ερήμους έως αστικούς οικισμούς και και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα ευρύ φάσμα χρηστών, όπως χομπίστες, ΜΚΟ, εκπαιδευτικούς αλλά και επιχειρηματίες παραγωγούς. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ενυδρειοπονία αλμυρού νερού είναι μια σχετικά νέα ιδέα, υπάρχει έλλειψη μοντέλων (ειδικά σε εμπορική κλίμακα) και εκπαιδευμένου ή έμπειρου προσωπικού ικανού να τρέξει συστήματα SA. Σε αντίθεση με τα συστήματα γλυκού νερού, υπάρχει επίσης μια περιορισμένη επιλογή κατάλληλων, βρώσιμων ειδών που αναπτύσσονται σε αλμυρό νερό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbott, I.A., others, 1997. Taxonomy of economic seaweeds with reference to some Pacific species, v. 6.
- Abreu, M.H., Pereira, R., Yarish, C., Buschmann, A.H., Sousa-Pinto, I., 2011. IMTA with *Gracilaria vermiculophylla*: Productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system. *Aquaculture* 312, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.036>
- Afonso, A., Matas, R.G., Maggiore, A., Merten, C., Robinson, T., 2017. EFSA's Activities on Emerging Risks in 2016. *EFS3* 14. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1336>
- Attramadal, K.J.K., Salvesen, I., Xue, R., Øie, G., Størseth, T.R., Vadstein, O., Olsen, Y., 2012. Recirculation as a possible microbial control strategy in the production of marine larvae. *Aquacultural Engineering* 46, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.10.003>
- Badiola, M., Mendiola, D., Bostock, J., 2012. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering* 51, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>
- Baquedano, E., 2000. Aztec, Inca & Maya. Dk Pub.
- Barak, P., Smith, J.D., Krueger, A.R., Peterson, L.A., 1996. Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. *Plant Cell Environ* 19, 237–242. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00246.x>
- Becke, C., Steinhagen, D., Schumann, M., Brinker, A., 2017. Physiological consequences for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) of short-term exposure to increased suspended solid load. *Aquacultural Engineering* 78, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.11.001>
- Bell, J.D., Bartley, D.M., Lorenzen, K., Loneragan, N.R., 2006. Restocking and stock enhancement of coastal fisheries: Potential, problems and progress. *Fisheries Research* 80, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.03.008>
- Ben Sassi, A., Harzallah-Skhiri, F., Bourgougnon, N., Aouni, M., 2008. Antiviral activity of some Tunisian medicinal plants against *Herpes simplex* virus type



1. Natural Product Research 22, 53–65.  
<https://doi.org/10.1080/14786410701589790>
- Bohl, M., 1977. Some initial aquaculture experiments in recirculating water systems. *Aquaculture* 11, 323–328. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(77\)90081-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90081-3)
- Boxman, S., Main, K., Nystrom, M., Ergas, S., Trotz, M., 2015. Aquaponic System Produces Red Drum. *Saltwater Vegetable Species* 58–60.
- Boxman, S.E., Nystrom, M., Capodice, J.C., Ergas, S.J., Main, K.L., Trotz, M.A., 2017. Effect of support medium, hydraulic loading rate and plant density on water quality and growth of halophytes in marine aquaponic systems. *Aquac Res* 48, 2463–2477. <https://doi.org/10.1111/are.13083>
- Buhmann, A., Papenbrock, J., 2013. An economic point of view of secondary compounds in halophytes. *Functional Plant Biol.* 40, 952. <https://doi.org/10.1071/FP12342>
- Buhmann, A.K., Waller, U., Wecker, B., Papenbrock, J., 2015. Optimization of culturing conditions and selection of species for the use of halophytes as biofilter for nutrient-rich saline water. *Agricultural Water Management* 149, 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.001>
- Buschmann, A.H., Troell, M., Kautsky, N., Kautsky, L., 1996. Integrated tank cultivation of salmonids and *Gracilaria chilensis* (Gracilariaceae, Rhodophyta). *Hydrobiologia* 326–327, 75–82. <https://doi.org/10.1007/BF00047789>
- Camargo, J.A., Alonso, Á., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International* 32, 831–849. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.002>
- Cerozi, B.S., Fitzsimmons, K., 2017. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems* 153, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>
- Chen, S., Stechey, D., Malone, R., 1994. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. *Developments in aquaculture and fisheries science* 27, 61–61.
- Chow, F., Macchiavello, J., Cruz, S.S., Fonck, E., Olivares, J., 2001. Utilization of *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta: Gracilariaceae) as a Biofilter in the Depuration of Effluents from Tank Cultures of Fish, Oysters, and Sea Urchins. *J World Aquaculture Soc* 32, 215–220. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2001.tb01098.x>

- Collins, M.T., Gratzek, J.B., Shotts Jr., E.B., Dawe, D.L., Campbell, L.M., Senn, D.R., 1975. Nitrification in an Aquatic Recirculating System. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 32, 2025–2031. <https://doi.org/10.1139/f75-238>
- Colt, J., Watten, B., 1988. Applications of pure oxygen in fish culture. *Aquacultural Engineering* 7, 397–441. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(88\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0144-8609(88)90003-9)
- Couturier, M., Trofimencoff, T., Buil, J.U., Conroy, J., 2009. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. *Aquacultural Engineering* 41, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.05.001>
- Cripps, S.J., Bergheim, A., 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural engineering* 22, 33–56.
- Cunsolo, F., Ruberto, G., Amico, V., Piattelli, M., 1993. Bioactive Metabolites from Sicilian Marine Fennel, *Crithmum maritimum*. *J. Nat. Prod.* 56, 1598–1600. <https://doi.org/10.1021/np50099a022>
- Danaher, J.J., Shultz, R.C., Rakocy, J.E., Bailey, D.S., 2013. Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems: RAFT AQUAPONIC SYSTEM. *J World Aquacult Soc* 44, 374–383. <https://doi.org/10.1111/jwas.12040>
- Davidson, J., Summerfelt, S., 2004. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m<sup>3</sup>) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering* 32, 245–271.
- del Río, M.J., Ramazanov, Z., García-Reina, G., 1996. *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia* 326–327, 61–66. <https://doi.org/10.1007/BF00047787>
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., Jijakli, M., 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucre*) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water* 8, 467. <https://doi.org/10.3390/w8100467>
- Díaz, F.J., Benes, S.E., Grattan, S.R., 2013. Field performance of halophytic species under irrigation with saline drainage water in the San Joaquin Valley of California. *Agricultural Water Management* 118, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.017>
- Dolan, E., Murphy, N., O’Hehir, M., 2013. Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 56, 42–50.

- Dufault, R.J., Korkmaz, A., 2000. Potential of Biosolids from Shrimp Aquaculture as a Fertilizer in Bell Pepper Production. *Compost Science & Utilization* 8, 310–319. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10702004>
- Dufault, R.J., Korkmaz, A., Ward, B., 2001. Potential of Biosolids from Shrimp Aquaculture as a Fertilizer for Broccoli Production. *Compost Science & Utilization* 9, 107–114. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2001.10702024>
- Ebeling, J.M., Timmons, M.B., Ebeling, J.M., 2010. Recirculating aquaculture. Cayuga Aqua Ventures.
- Emerenciano, M., Carneiro, P., Lapa, M., Lapa, K., Delaide, B., Goddek, S., 2017. Mineralização de sólidos. *Aquac Bras* 21–26.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., 2014. Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment* 52, 744–752. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826336>
- Eshchar, M., Mozes, N., Fediuk, M., 2003. Carbon dioxide removal rate by aeration devices in marine fish tanks.
- FA1305, C.A., 2017. Report on a Workshop with representatives from DG MARE, DG AGRI and DG RTD. 5 p.
- Faccini, A.L., Berchez, F., 2000. Management of natural beds and standing stock evaluation of *Hypnea musciformis* (Gigartinales, Rhodophyta) in south-eastern Brazil. *Journal of Applied Phycology* 12, 101–103. <https://doi.org/10.1023/A:1008120229562>
- FAO, 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in Action. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernandes, P., Pedersen, L.-F., Pedersen, P.B., 2015. Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 65, 17–26.
- Fronte, B., Galliano, G., Bibbiani, C., 2016. From freshwater to marine aquaponic: new opportunities for marine fish species production 20.
- Ganesan, M., Thirupathi, S., Jha, B., 2006. Mariculture of *Hypnea musciformis* (Wulfen) Lamouroux in South east coast of India. *Aquaculture* 256, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.01.039>
- Gericke, W.F., 1937. HYDROPONICS--CROP PRODUCTION IN LIQUID CULTURE MEDIA. *Science* 85, 177–178. <https://doi.org/10.1126/science.85.2198.177>

- Goddek, S., 2017. Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems (PhD Thesis). Wageningen University.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R., 2015. Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7, 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), 2019. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Gonçalves, A.A., Gagnon, G.A., 2011. Ozone Application in Recirculating Aquaculture System: An Overview. *Ozone: Science & Engineering* 33, 345–367. <https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595>
- Gooley, G.J., Gavine, F.M., 2003. *Integrated agri-aquaculture systems: a resource handbook for Australian industry development*. Rural Industries Research and Development Corporation.
- 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>
- Granada, L., Sousa, N., Lopes, S., Lemos, M.F.L., 2016. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? - a review. *Rev Aquacult* 8, 283–300. <https://doi.org/10.1111/raq.12093>
- Gunning, D., 2016. *Cultivating Salicornia europaea (marsh samphire)*. Dublin, Ireland: Irish Sea Fisheries Board.
- Gunning, D., Maguire, J., Burnell, G., 2016. The Development of Sustainable Saltwater-Based Food Production Systems: A Review of Established and Novel Concepts. *Water* 8, 598. <https://doi.org/10.3390/w8120598>
- Gutierrez-Wing, M.T., Malone, R.F., 2006. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering* 34, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.003>
- Haines, K., 1976. Growth of the carrageenan-producing tropical red seaweed *Hypnea musciformis* in surface water, 870m deep water, effluent from a clam mariculture system, and in deep water enriched with artificial fertilizers or domestic sewage.
- Halwart, M., Gupta, M.V., 2004. *Culture of fish in rice fields*. FAO; WorldFish Center.

- Joesting, H.M., Blaylock, R., Biber, P., Ray, A., 2016. The use of marine aquaculture solid waste for nursery production of the salt marsh plants *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus*. *Aquaculture Reports* 3, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2016.01.004>
- Jones Jr, J.B., 2016. *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press.
- Jung, I., Lovitt, R., 2011. Leaching techniques to remove metals and potentially hazardous nutrients from trout farm sludge. *water research* 45, 5977–5986.
- Karimanzira, D., Keesman, K.J., Kloas, W., Baganz, D., Rauschenbach, T., 2016. Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system. *Aquacultural Engineering* 75, 29–45. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.10.004>
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Staaks, G., Suhl, J., Tschirner, M., Wittstock, B., Wuertz, S., Zikova, A., Rennert, B., 2015. A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquacult. Environ. Interact.* 7, 179–192. <https://doi.org/10.3354/aei00146>
- Knaus, U., Palm, H.W., 2017. Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture* 473, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.020>
- Komives, T., Junge, R., 2015. On the aquaponic corner section of our journal : editorial. <https://doi.org/10.21256/ZHAW-3452>
- Kong, Y., Zheng, Y., 2014. Potential of Producing *Salicornia bigelovii* Hydroponically as a Vegetable at Moderate NaCl Salinity. *horts* 49, 1154–1157. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.9.1154>
- Kotzen, B., Appelbaum, S., 2010. An Investigation of Aquaponics Using Brackish Water Resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture* 22, 297–320. <https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571>
- Kunkel, G., 1984. *Plants for human consumption: an annotated checklist of the edible phanerogams and ferns*. Koeltz Scientific Books, Koenigstein.
- Langton, R.W., Haines, K.C., Lyon, R.E., 1977. Ammonia-nitrogen production by the bivalve mollusc *Tapes japonica* and its recovery by the red seaweed *Hypnea musciformis* in a tropical mariculture system. *Helgolander Wiss. Meeresunters* 30, 217–229. <https://doi.org/10.1007/BF02207837>

- Lekang, O.-I., 2013. *Aquaculture engineering*, Second Edition. ed. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK.
- Lennard, W., 2017. *Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production*. Wilson Lennard.
- Love, D.C., Fry, J.P., Genello, L., Hill, E.S., Frederick, J.A., Li, X., Semmens, K., 2014. An International Survey of Aquaponics Practitioners. *PLoS ONE* 9, e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., Thompson, R.E., 2015. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>
- Loyacano, H., Grosvenor, R., 1973. Effects of Chinese waterchestnut in floating rafts on production of channel catfish in plastic pools, in: *Proc Annu Conf Southeast Assoc Game Fish Comm*. pp. 471–473.
- Lymbery, A.J., Doupé, R.G., Bennett, T., Starcevich, M.R., 2006. Efficacy of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.03.004>
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C.J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J.P., d’Orbcastel, E.R., Verreth, J.A.J., 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 43, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Michaud, L., Blancheton, J.P., Bruni, V., Piedrahita, R., 2006. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquacultural Engineering* 34, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.005>
- Mirzoyan, N., Gross, A., 2013. Use of UASB reactors for brackish aquaculture sludge digestion under different conditions. *Water research* 47, 2843–2850.
- Mohammed Evuti, A., Hassan, M., Zainon Noor, Z., Raja Ibrahim, R., 2014. Application of a packed column air stripper in the removal of volatile organic compounds from wastewater. *Reviews in Chemical Engineering* 30. <https://doi.org/10.1515/revce-2014-0003>

- Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W., Wuertz, S., 2017. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquaculture Environment Interactions* 9, 9–18.
- Moran, D., 2010. Carbon dioxide degassing in fresh and saline water. I: Degassing performance of a cascade column. *Aquacultural Engineering* 43, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.05.001>
- Morehart, C.T., 2016. CHINAMPA AGRICULTURE, SURPLUS PRODUCTION, AND POLITICAL CHANGE AT XALTOCAN, MEXICO. *Ancient Mesoam* 27, 183–196. <https://doi.org/10.1017/S0956536116000109>
- Naegel, L.C.A., 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture* 10, 17–24. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(77\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90029-1)
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M., Yarish, C., 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231, 361–391. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.015>
- Neori, A., Cohen, I., Gordin, H., 1991. *Ulva lactuca* Biofilters for Marine Fishpond Effluents. II. Growth Rate, Yield and C:N Ratio. *Botanica Marina* 34. <https://doi.org/10.1515/botm.1991.34.6.483>
- Noga, E.J., 2010. *Fish disease: diagnosis and treatment*. John Wiley & Sons.
- Nozzi, V., Parisi, G., Di 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* 8, 423.
- Oh, C., Ji, S.-W., Cheong, Y., Yim, G.-J., Hong, J., 2016. Evaluation of design factors for cascade aerator to enhance efficiency of oxidation pond for ferruginous mine drainage. *Environmental Technology* 37, 1–37. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1153154>
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., Kotzen, B., 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquacult Int* 26, 813–842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Panigrahi, G.K., Sasmita, P., Surendra, P., 2016. Aquaponics: An innovative approach of symbiotic farming. *International Journal of Bioassays* 5, 4808. <https://doi.org/10.21746/ijbio.2016.09.005>

- Pantarella, E., 2012. Integrated marine aquaculture-agriculture: sea farming out of the sea. *Global Aquaculture Advocate*: Portsmouth, NH, USA 70–72.
- Prosser, J.I., 1990. Autotrophic nitrification in bacteria, in: *Advances in Microbial Physiology*. Elsevier, pp. 125–181.
- Rakocy, J., 2007. Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J* 46, 14–17.
- Rakocy, J., 1993. Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. *Techniques for modern aquaculture* 112–136.
- Rakocy, J., Masser, M., Losordo, T., 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center, publication no. 454.
- Rakocy, J., Shultz, R.C., Bailey, D.S., Thoman, E.S., 2004. AQUAPONIC PRODUCTION OF TILAPIA AND BASIL: COMPARING A BATCH AND STAGGERED CROPPING SYSTEM. *Acta Hortic.* 63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8>
- Rakocy, J.E., 2012. Aquaponics: integrating fish and plant culture. *Aquaculture production systems* 1, 343–386.
- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, R.C., Thoman, E.S., 2004. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system, in: *New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, Held September. pp. 12–16.
- Randall, D.J., Tsui, T.K.N., 2002. Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin* 45, 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)
- Reis, R.P., Yoneshigue-Valentin, Y., Pereira dos Santos, C., 2008. Spatial and temporal variation of *Hypnea musciformis* carrageenan (Rhodophyta - Gigartinales) from natural beds in Rio de Janeiro State, Brazil. *J Appl Phycol* 20, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9173-8>
- Resh, H.M., 2012. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press.
- Seawright, D.E., Stickney, R.R., Walker, R.B., 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems. *Aquaculture* 160, 215–237. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3)
- Shahzad, M.W., Burhan, M., Ang, L., Ng, K.C., 2017. Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination* 413, 52–64.



- Sharrer, M.J., Summerfelt, S.T., Bullock, G.L., Gleason, L.E., Taeuber, J., 2005. Inactivation of bacteria using ultraviolet irradiation in a recirculating salmonid culture system. *Aquacultural Engineering* 33, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.001>
- Speranza, M., D’Arco, M., Ferroni, L., 2015. ECOLOGICAL PERFORMANCES OF PLANT SPECIES OF HALOPHILOUS HYDROMORPHIC ECOSYSTEMS. *EQA - International Journal of Environmental Quality* 55-70 Pages. <https://doi.org/10.6092/ISSN.2281-4485/6004>
- Sturtevant, E.L., 1972. *Sturtevant’s edible plants of the world*. Dover Publications, New York.
- Subramani, A., Jacangelo, J.G., 2015. Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. *Water research* 75, 164–187.
- 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. *Agricultural Water Management* 178, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>
- Summerfelt, S.T., 2003. Ozonation and UV irradiation—an introduction and examples of current applications. *Aquacultural Engineering* 28, 21–36. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9)
- Summerfelt, S.T., Sharrer, M.J., Tsukuda, S.M., Gearheart, M., 2009. Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation. *Aquacultural Engineering* 40, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.10.002>
- Tran, H., 2015. Aquaponics-coupled and decoupled systems and the water quality needs of each. 680–680.
- Troell, M., Halling, C., Neori, A., Chopin, T., Buschmann, A.H., Kautsky, N., Yarish, C., 2003. Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture* 226, 69–90. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00469-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00469-1)
- Turcios, A., 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>
- Tyson, R.V., Simonne, E.H., Treadwell, D.D., White, J.M., Simonne, A., 2008. Reconciling pH for Ammonia Biofiltration and Cucumber Yield in a

- Recirculating Aquaponic System with Perlite Biofilters. *hortsc* 43, 719–724.  
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.719>
- van Rijn, J., Tal, Y., Schreier, H.J., 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 34, 364–376.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.004>
- Vandermeulen, H., Gordin, H., 1990. Ammonium uptake using *Ulva* (Chlorophyta) in intensive fishpond systems: mass culture and treatment of effluent. *J Appl Phycol* 2, 363–374. <https://doi.org/10.1007/BF02180927>
- Vlahos, N., Levizou, E., Stathopoulou, P., Berillis, P., Antonopoulou, E., Bekiari, V., Krigas, N., Kormas, K., Mente, E., 2019. An Experimental Brackish Aquaponic System Using Juvenile Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) and Rock Samphire (*Crithmum maritimum*). *Sustainability* 11, 4820.  
<https://doi.org/10.3390/su11184820>
- Waller, U., Buhmann, A.K., Ernst, A., Hanke, V., Kulakowski, A., Wecker, B., Orellana, J., Papenbrock, J., 2015. Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. *Aquacult Int* 23, 1473–1489.  
<https://doi.org/10.1007/s10499-015-9898-3>
- Wilson, G., 2005. Seaweed is the common denominator in exciting saltwater aquaponics. *Aquaponics J* 36, 12–16.
- worldometer.info, n.d. <https://www.worldometers.info/world-population/> [WWW Document]. URL (accessed 9.25.20).
- Zhang, S.-Y., Li, G., Wu, H.-B., Liu, X.-G., Yao, Y.-H., Tao, L., Liu, H., 2011. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquacultural Engineering* 45, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.08.001>