



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ, ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

**Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση χρήσης νεροφακής προς
αντικατάσταση του βιοφίλτρου και παραγωγή φυτικής
πρωτεΐνης σε κλειστό σύστημα υδατοκαλλιέργειών**

Νικόλαος Θ. Σαγανάς

Τριμελής Επιτροπή

Ερευνητής Γ΄ Γιώργος Μάρκου (Επιβλέπων)
Αν. Καθηγητής Δημήτριος Χατζηνικολάου
Ερευνητής Β΄ Θάνος Μπαλαφούτης

Αθήνα-Πειραιάς, Ελλάδα, Ιούνιος 2022



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

**M.Sc. in Bioeconomy, circular economy
and sustainability**

**Techno-economical assessment of using duckweed
to replace biofilter and producing plant-based
protein in recirculating aquaculture system**

by

Nikolaos T. Saganas

Advisory Committee

Researcher Giorgos Markou
(Supervisor)

Ass. Professor Dimitrios
Chatzinikolaou

Researcher B' Dr. Thanos Balafoutis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Γιώργο Μάρκου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τους δύο καθηγητές από την Τριμελή μου Επιτροπή και συγκεκριμένα τον κ. Χατζηνικολάου και τον κ. Μπαλαφούτη για τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους παράγοντες του ΠΜΣ ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ, ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ που μέσα από αυτό απέκτησα εκείνες τις απαραίτητες γνώσεις και εμπειρία ώστε να καταφέρω να πετύχω τους μελλοντικούς μου στόχους εις ότι αφορά την διεπιστημονικότητα και την επαγγελματική μου πορεία .

Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της χρήσης νεροφακής για την αντικατάσταση του βιοφίλτρου και παραγωγή φυτικής πρωτεΐνης σε κλειστό σύστημα υδατοκαλλιεργειών

Σημαντικοί Όροι: Νεροφακή,υδατοδεξαμενή, απόνερα υδατοκαλλιεργειών, φυτοεξυγίανση ,παραγωγή πρωτεΐνης, κλειστό σύστημα υδατοκαλλιεργειών(RAS), επίπεδο συγκομιδής υδραυλικός χρόνος παραμονής(HRT),συσσώρευση,βιοφίλτρο ,απομάκρυνση αμμωνίας,καθαρή ταμειακή ροή , καθαρή παρούσα αξία, εσωτερικός συντελεστής απόδοσης,ανάλυση ευαισθησίας.

Περίληψη

Η νεροφακή (*Lemna minor*, *Duckweed*) μπορεί να συντελέσει στην μείωση του κόστους και των αποβλήτων σε ένα κλειστό σύστημα υδατοκαλλιεργειών RAS (Recirculating Aquaculture System) με στόχο μια «βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια». Σε αυτή τη μελέτη, σε δώδεκα υδατοδεξαμενές καλλιεργήθηκε νεροφακή με διακύμανση ως προς το επίπεδο συγκομιδής της φυτικής βιομάζας και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) του υποστρώματος. Η ανάπτυξη των καλλιεργιών πραγματοποιήθηκε σε τεχνητό υπόστρωμα κλειστού συστηματού υδατοκαλλιεργειών τιλάπιας. Με βάση τις μετρήσεις, η τελική παραγωγή βιομάζας ήταν μικρή σε σχέση με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, ωστόσο, το πρωτεϊνικό περιεχόμενο ήταν σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με άλλα πρωτεϊνούχα φυτά. Παράλληλα, έλαβε χώρα οικονομοτεχνική μελέτη ανάμεσα σε μονάδα κλειστού συστήματος που χρησιμοποιεί βιοφίλτρο (BFR) και σε μονάδα που αντί για βιοφίλτρο χρησιμοποιεί καλλιέργεια νεροφακής (DWD), η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται για να καλύψει σε μεγάλο ποσοστό τις πρωτεϊνικές ανάγκες τις τιλάπιας (*Oreochromis sp.*).

Τελικά, το υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο της νεροφακής και η μεγαλύτερη ΚΠΑ (Καθαρή Παρούσα Αξία) και ΕΣΑ (Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης), του αντίστοιχου κλειστού συστήματος RAS, ανέδειξε τη συγκεκριμένη πρακτική ως οικονομικά βιώσιμη. Παρόλα αυτά, η αυξημένη συσσώρευση θρεπτικών συστατικών που παρατηρήθηκε στο μέσο ανάπτυξης και η συνεπαγόμενη αδυναμία επαρκούς εξυγίανσης του τελευταίου, απαιτεί περαιτέρω πειραματισμό για τον καθορισμό των

βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης, όπως π.χ η θερμοκρασία, η εκλογή του κατάλληλου HRT, η επιλογή του σωστού ποσοστού ημερήσιας συγκομιδής κ.ά.

Techno-economical assessment of using duckweed to replace biofilter and producing plant-based protein in recirculating aquaculture system

Keywords: Duckweed (*Lemna minor*), ponds, aquaculture wastewater, phytoremediation, protein production, recirculating aquaculture system (RAS), harvest level, hydraulic retention time (HRT), accumulation, biofilter, ammonia removal, net cash flow, net present value, internal rate of return, sensitivity analysis

Abstract

Duckweed (*Lemna minor*) can help reduce the cost of fish feed and waste in a recirculating Aquaculture System. In this study, we developed duckweed cultivation in twelve ponds, with variation at the harvest level and the HRT (Hydraulic Retention Time). During cultivation, we added nutrient solution to ponds, as a replacement of the water derived from a recirculating aquaculture system of tilapia (*Oreochromis sp.*). Based on measurements, the final biomass production was smaller than that of bibliographical resources. However, the protein content was significantly greater comparing to other plants rich in proteins. Additionally, we carried out a technoeconomical survey, aiming to compare, financially and technically, a RAS (Recirculating Aquaculture System) that uses a biofilter (BFR) and a RAS (DWD), which, instead of biofilter, applies a duckweed culture, and the latter is utilized to cover the protein needs of fish.

Finally, the high protein content of the duckweed, the greater NPV (Net Present Value) and the IRR (Internal Rate of Return) of the initial RAS (BFR), showed up the financial sustainability of this technology. Nevertheless, the high nutrient accumulation that took place in the water, and the implied inefficiency of bioremediation, requires further experimentation, in order to define the most suitable development conditions, e.g. temperature, the selection of the best HRT, the choice of the appropriate daily harvest percentage etc.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Κατάλογος εικόνων	11
Κατάλογος πινάκων	12
Κατάλογος διαγραμμάτων	13
Κατάλογος Μονάδων, Ακρωνυμίων & Συμβόλων	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας	15
1.1. Εισαγωγή	15
1.1.1. Παγκόσμια δεδομένα και βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια	15
1.2. Κλειστό σύστημα RAS (Recirculating Aquaculture System)	17
1.2.1. Γενικά	17
1.2.2. Μέρη του κλειστού συστήματος RAS	17
1.2.3. Βιοφίλτρο	18
1.2.4. Διατροφή των ιχθύων και βιωσιμότητα της υδατοκαλλιέργειας στο σύστημα RAS	19
1.2.5. FCR	20
1.3. Η νεροφακή	21
1.3.1. Το φυτό νεροφακή	21
1.3.1.1. Βοτανική ταξινόμηση της νεροφακής	21
1.3.1.2. Βιότοποι	22
1.3.1.3. Μορφολογία	22
1.3.1.4. Αναπαραγωγή	23
1.3.2. Περιβαλλοντικοί παράγοντες	25
1.3.2.1. Θερμοκρασία	25
1.3.2.2. Ηλιοφάνεια (ένταση φωτός)	26
1.3.2.3. Ενεργός οξύτητα (pH)	27
1.3.2.4. Άζωτο	27
1.3.2.5. Φόσφορος και Κάλιο	27
1.3.2.6. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	28
1.3.2.7. Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	28
1.3.2.8. Πυκνότητα φυτών	28
1.3.3. Θρεπτική αξία	28
1.3.4. Παραγωγικότητα	31

1.4. Εφαρμογές και αξιοποίηση της νεροφακής	32
1.4.1. Γενικά	32
1.4.2. Χρήση ως τροφή για τον άνθρωπο και τα ζώα	34
1.4.2.1. Νεροφακή για ανθρώπινη κατανάλωση	35
1.4.2.2. Άμεσοι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία	35
1.4.2.3. Έμμεσοι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία	37
1.4.3. Χρήση ως ζωοτροφή	37
1.4.3.1. Ψάρια	38
1.4.3.2. Πτηνά	41
1.4.3.3. Χοίροι	41
1.4.4. Άλλοι περιορισμοί αξιοποίησης της νεροφακής	41
1.4.5. Άλλες εφαρμογές της νεροφακής	43
1.4.5.1. Φυτοεξυγίανση μολυσμένων νερών και αποβλήτων	43
1.4.5.2. Παραγωγή βιοκαυσίμου	46
1.4.5.3. Εντομοκτόνο	46
1.4.5.4. Αλγεοκτόνα	47
1.5. Σκοπός της μελέτης	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	48
Υλικά και Μέθοδοι	48
A ΜΕΡΟΣ	48
A.2. Πειραματικό μέρος	48
A.2.1. Μετρήσεις	51
A.2.1.1. Συσκευές	51
A.2.2. Αναλυτικές μέθοδοι	52
A.2.2.1. Μέτρηση πρωτεϊνικού περιεχομένου	52
A.2.2.2. Μέτρηση Φωσφόρου	53
A.2.2.3. Μέτρηση Αμμωνιακού και Νιτρικού αζώτου	53
B ΜΕΡΟΣ	54
B.2. Οικονομοτεχνική μελέτη	54
B.2.1. Μεθοδολογία	54
B.2.2. Γενικά χαρακτηριστικά της μονάδας του έργου BFR	55
B.2.3. Γενικά χαρακτηριστικά της μονάδας του έργου DWD	56
B.2.3.1. Εισαγωγή	56
B.2.3.2. Διευκρινίσεις	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	58

Αποτελέσματα	58
A ΜΕΡΟΣ	58
A.3. Αποτελέσματα πειραματικού μέρους	58
A.3.1. Παραγωγή βιομάζας	58
A.3.2. Η διαμόρφωση του pH και του διαλυμένου οξυγόνου (DO).	60
A.3.3. Αμμωνιακά, νιτρικά και φωσφορικά ιόντα.	61
A.3.4. Πρωτεϊνικό περιεχόμενο	64
B ΜΕΡΟΣ	67
B.3. Ανάλυση κόστους επένδυσης του έργου DWD	67
B.3.1. Βιοφίλτρο	67
B.3.2. Κόστος ξηραντήρα	67
B.3.3. Κόστος γης	68
B.3.4. Κόστος μηχανήματος συγκομιδής	68
B.3.5. Κόστος παραγωγής του έργου DWD	68
B.3.5.1. Κόστος τροφής με χρήση νεροφακής (έργο DWD)	68
B.3.5.2. Κόστος εργατικού προσωπικού με χρήση νεροφακής (έργο DWD)	69
B.3.5.3. Σύνοψη	69
B.3.6. Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής σύγκρισης των έργων BFR και DWD	70
B.3.6.1. Σύγκριση έργων BFR και DWD	71
B.3.7. Ανάλυση ευαισθησίας	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	73
Συμπεράσματα και προτάσεις	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75
Ελληνική	75
Ξένη	75
Διαδικτυακοί τόποι	90

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Προβλέψεις για την παγκόσμια παραγωγή των ιχθυοκαλλιεργειών (FAO, 2020).	15
Εικόνα 2. Βασικός σχεδιασμός ενός κλειστού συστήματος RAS (Bregnballe, 2015).	18
Εικόνα 3. Ικανότητα μετατροπής της τροφής σε κρεοπαραγωγή ζώα (Hall κ.ά., 2011).	20
Εικόνα 4. Η συστηματική ταξινόμηση της νεροφακής (Sree κ.ά., 2016).....	21
Εικόνα 5. Λίμνη που περιέχει πυκνό στρώμα νεροφακής, δύο ειδών (<i>Lemna minor</i> και <i>Spirodela polyrrhiza</i>) (αριστερά). Φυλλοειδείς προεκτάσεις της <i>Lemna minor</i> (δεξιά) (Kutschera & Niklas, 2014).	23
Εικόνα 6. Η κάτω (A) και άνω (B) επιφάνεια των φυλλοειδών προεκτάσεων της <i>Spirodela polyrrhiza</i> . Η φυτική ανάπτυξη της <i>Spirodela polyrrhiza</i> με αγενή πολλαπλασιασμό, με διαχωρισμό των θυγατρικών προεκτάσεων (C) (Kutschera & Niklas, 2014).....	24
Εικόνα 7. Φυτική αποικία φύλλων-φυτών νεροφακής (Kutschera & Niklas, 2014)...	25
Εικόνα 8. Διατροφική αξία και πρωτεϊνικό προφίλ νεροφακής (internet source).	29
Εικόνα 9. Σύγκριση νεροφακής και άλλων φυτών ως προς ορισμένα διατροφικά χαρακτηριστικά (Hillman & Culley, 1978).	29
Εικόνα 10. Βασικά συστατικά σε έξι είδη νεροφακής. (A) Ξηρό βάρος (%), (B) Ολικό περιεχόμενο σε πρωτεΐνες, (C) Ολικό περιεχόμενο σε λιπαρά οξέα, (D) Ολικό περιεχόμενο σε άμυλο. (B,C,D) % περιεχόμενα ως προς την ξηρή μάζα (Appenroth κ.ά., 2017).	31
Εικόνα 11. Μοντέλα βιοαποκατάστασης με χρήση φυτών νεροφακής (Ansal κ.ά., 2010).	46
Εικόνα 12. Χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος του κύριου πειράματος.	49
Εικόνα 13. Χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος (Hoagland solution) του μέσου ανάπτυξης στο πείραμα που προηγήθηκε του κύριου πειράματος	50
Εικόνα 14. Οι υδατοδεξαμενές με τη νεροφακή.....	50

Εικόνα 15. Οι υδατοδεξαμενές με τη νεροφακή.....	51
Εικόνα 16. Το πεχάμετρο (Hanna Instruments, pH 209).....	51
Εικόνα 17. Η συσκευή με την οποία μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) Cyberscan 200 (Eutech Instruments).	52
Εικόνα 18. Το μοριακό φασματοφωτόμετρο (DR LANGE CADAS 50).....	52
Εικόνα 19. Η συσκευή με την οποία μετρήθηκε το διαλυμένο οξυγόνο (DO) (HQ40d, Hach Instruments).	52
Εικόνα 20. Η φυτική κάλυψη των υδατοδεξαμενών στα 2 επίπεδα συγκομιδής την 6η ημέρα. Είναι φανερή η αδυναμία της νεροφακής του επιπέδου 30% να καλύψει την επιφάνεια της δεξαμενής.....	58
Εικόνα 21. Ξηραντήρας για την αποξήρανση των φυτών της νεροφακής.	67
Εικόνα 22. Μηχάνημα συγκομιδής της νεροφακής. “Duckweed guzzler with belt” ..	68

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Υδραυλικοί χρόνοι παραμονής και ποσότητες συνθετικού υποστρώματος	50
Πίνακας 2. Εξισώσεις παλινδρόμησης των πρότυπων καμπυλών και R^2	53
Πίνακας 3 Υπολογισμός καθαρών ταμειακών ροών	55
Πίνακας 4. Οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας έργου BFR.....	55
Πίνακας 5. Κόστη επένδυσης μονάδας έργου BFR.....	55
Πίνακας 6. Κόστη παραγωγής μονάδας έργου BFR.....	56
Πίνακας 7. Βιοχημικά μεγέθη και δείκτες ιχθυομονάδας.....	56
Πίνακας 8. Μέσες τιμές ποσοτήτων βιομάζας από κάθε δεξαμενή όπως καταγράφηκαν την τελευταία μέρα	59
Πίνακας 9. Η συνολική παραγωγή πρωτεΐνης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT).....	65
Πίνακας 10. Κόστη επένδυσης μονάδας έργου DWD.....	69
Πίνακας 11. Κόστη παραγωγής μονάδας έργου DWD.....	69

Πίνακας 12. Οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων που χρησιμοποιούν βιοφίλτρο (έργο BFR) Υπολογισμός ΚΤΡ	70
Πίνακας 13. Οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων που χρησιμοποιούν νεροφακή (έργο DWD) Υπολογισμός ΚΤΡ	70
Πίνακας 14. Υπολογισμός ΚΠΑ και ΕΣΑ του έργου BFR	70
Πίνακας 15. Υπολογισμός ΚΠΑ και ΕΣΑ του έργου BFR	71

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Η παραγωγή βιομάζας σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT, ημέρες).....	59
Διάγραμμα 2. Η διαμόρφωση του pH του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT)	60
Διάγραμμα 3. Η διαμόρφωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT).....	61
Διάγραμμα 4. Η συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής.....	62
Διάγραμμα 5. Η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής.....	62
Διάγραμμα 6. Η συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής.....	63
Διάγραμμα 7. Ημερήσια διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο μέσο ανάπτυξης για κάθε HRT.....	65
Διάγραμμα 8. Ανάλυση ευαισθησίας της Κ.Π.Α. DWD σε σχέση με την ετήσια παραγωγικότητα νεροφακής σε τόνους	72

Κατάλογος Μονάδων, Ακρωνυμίων & Συμβόλων

Σύμβολα	Μονάδες	Ονομασία
HRT	Lpm	υδραυλικός χρόνος παραμονής
Q	lpm	ρόη νερού
D	m	διάμετρος
H	m	ύψος-βάθος
r	m	ακτίνα
V	m ³	όγκος
A	m ²	επιφάνεια
PTAN	kg/day	παραγωγή ολικής αμμωνίας
PCO ₂	kg/day	παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα
PO ₂	kg/day	καταναλισκόμενο οξυγόνο
PTSS	kg/day	παραγωγή στερεών σωμάτων
TAN	mg/L	ολικό αμμωνιακό άζωτο
EC	mS	ηλεκτρική αγωγιμότητα

Acronyms-Ακρωνύμια	
NH ₄ ⁺	Αμμωνιακό ιόν
NH ₃	Αμμωνία
NO ₃ ⁻	Νιτρικό ιόν
PO ₄ ⁻³	Φωσφορικό ιόν
NO ₂ ⁻	Νιτρώδη
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα
DO	Διαλυμένο οξυγόνο

Σύμβολα Αγγλική/Ελληνική ονομασία	
FCR	feed conversion ratio/συντελεστής μετατρεψιμότητας τροφής
BW	bodyweight/σωματικό βάρος
D	depreciation/απόσβεση
i	interest rate/επιτόκιο
k	απαιτούμενη απόδοση
NCF(ΚΤΡ)	net cash flow/καθαρές ταμειακές ροές
NPV(ΚΠΑ)	net present value/καθαρή παρούσα αξία
PV(ΠΑ)	present value/παρούσα αξία
IRR(Ε.Σ.Α)	internal rate of return/εσωτερικός συντελεστής απόδοσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Παγκόσμια δεδομένα και βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια

Σύμφωνα με στοιχεία του FAO (2011) η αύξηση του πληθυσμού από τα 7 σήμερα στα 9 δισεκατομμύρια το 2050, θα προκαλέσει αύξηση της ζήτησης τροφίμων κατά 70-100% σε παγκόσμια κλίμακα (Lewandowski, 2018). Παράλληλα, η εξάντληση των φυσικών πόρων επιβάλλει τον περιορισμό κατανάλωσης νερού και ενέργειας (Willett, 2019; Sanders, 2018), χωρίς όμως ταυτόχρονη υποβάθμιση της παραγόμενης τροφής ως προς την ασφάλεια και την ποιότητα (United Nations, 2017; IAEG-SDGs, 2018).

	Production			Of which aquaculture		
	2018	2030	Growth of 2030 vs 2018	2018	2030	Growth of 2030 vs 2018
	(1 000 tonnes)		(%)	(1 000 tonnes)		(%)
Asia	122 404	145 850	19.2	72 820	96 350	32.3
China	62 207	73 720	18.5	47 559	60 450	27.1
India	12 386	15 610	26.0	7 066	10 040	42.1
Indonesia	12 642	14 940	18.2	5 427	7 710	42.1
Japan	3 774	3 520	-6.7	643	740	15.1
Philippines	2 876	3 220	12.0	826	905	9.6
Republic of Korea	1 905	1 850	-2.9	568	605	6.4
Thailand	2 598	2 790	7.4	891	1 220	36.9
Viet Nam	7 481	9 590	28.2	4 134	6 020	45.6
Africa	12 268	13 820	12.7	2 196	3 249	48.0
Egypt	1 935	2 610	34.9	1 561	2 220	42.2
Nigeria	1 169	1 275	9.0	291	365	25.3
South Africa	566	594	5.0	6	10	61.8
Europe	18 102	19 290	6.6	3 075	3 620	17.7
European Union ¹	5 879	6 025	2.5	1 167	1 320	13.1
Norway	3 844	3 960	3.0	1 355	1 620	19.6
Russian Federation	5 308	6 010	13.2	200	312	56.4
North America	6 536	6 981	6.8	660	838	27.1
Canada	1 019	1 120	9.9	191	255	33.3
United States of America	5 213	5 590	7.2	468	582	24.3
Latin America and Caribbean	17 587	16 730	-4.9	3 140	4 170	32.8
Argentina	839	905	7.9	3	4	24.8
Brazil	1 319	1 490	12.9	605	800	32.2
Chile	3 388	3 950	16.6	1 266	1 650	30.3
Mexico	1 939	2 050	5.7	247	365	47.7
Peru	7 273	5 600	-23.0	104	160	54.4
Oceania	1 617	1 750	8.2	205	290	41.3
Australia	281	360	28.0	97	150	55.0
New Zealand	511	560	9.5	105	135	29.1
World²	178 529	204 421	14.5	82 095	108 517	32.2
Developed countries	29 233	30 730	5.1	4 603	5 499	19.5
Developing countries	135 096	173 691	28.6	73 330	103 018	40.5

¹ Cyprus is included in Asia as well as in the European Union.
² For 2018, the aggregate includes also 14 263 tonnes for not identified countries, data not included in any other aggregates.
 SOURCE: FAO.

Εικόνα 1. Προβλέψεις για την παγκόσμια παραγωγή των ιχθυοκαλλιεργειών (FAO, 2020).

Δεδομένων των συνθηκών αυτών, σημαντικό ρόλο θα παίξουν οι υδατοκαλλιέργειες, των οποίων η παραγωγή αυξάνεται συνεχώς τόσο σε αξία οικονομική (FAO, 2020) **(Εικόνα 1)** όσο και διατροφική (Κλαουδάτος & Κλαουδάτος, 2010). Επίσης, η κατανάλωση ιχθύων ξεπέρασε τα άλλα είδη πρωτεΐνης που καταναλώνονται, πλην της πτηνοτροφίας.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η παραγωγή των υδατοκαλλιεργειών πρέπει να εντατικοποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστούν περισσότεροι φυσικοί πόροι και νερό για την κάλυψη των αναγκών τους, ταυτόχρονα αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτων με δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αν δεν εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα και δεν υιοθετηθούν πρακτικές προς μια «βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια» (Daudaa, 2019). Στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης, το φρέσκο νερό και η τροφή οφείλουν κατά κύριο λόγο να διατίθενται στον ολοένα και αυξανόμενο ανθρώπινο πληθυσμό, γεγονός που επιτείνει τον ήδη υπάρχον ανταγωνισμό για νερό (γεωργία, βιομηχανίες κλπ) και για τροφές (κτηνοτροφία, ιχθυοτροφία κλπ) (EWRA, 2004; Behera κ.ά, 2019; FAO2020).

Η εξεύρεση, λοιπόν, ενός εναλλακτικού τρόπου διαχείρισης του νερού είναι επιτακτική, και προς αυτό το σκοπό μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εντατική καλλιέργεια (κλειστό σύστημα εκτροφής ή Recirculating Aquaculture System, RAS), η οποία πλεονεκτεί έναντι των παραδοσιακών υδατοκαλλιεργειών ως προς τις υψηλότερες αποδόσεις και τις μειωμένες απαιτήσεις σε νερό (Lewandowski, 2018; Faisal & Hai, 2018). Πιο συγκεκριμένα, απαιτεί 90-99% λιγότερο νερό από τις συμβατικές υδατοκαλλιέργειες, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει την τοπική παραγωγή ιχθύων από άποψη ποιότητας και διατροφικής ασφάλειας (Timmons κ.ά., 2018). Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά του, το κλειστό σύστημα RAS δεν αποτελεί ευρέως εφαρμόσιμη πρακτική, κι αυτό οφείλεται κυρίως στα περίπλοκα και κοστοβόρα μέρη (σταθερά και λειτουργικά) από τα οποία απαρτίζεται. Επιπρόσθετα, τα ήδη υπάρχοντα συστήματα επεξεργασίας του νερού εκτροφής, το υψηλό κόστος διατροφής και τα συστατικά των ιχθυοτροφών δεν συμβαδίζουν επαρκώς με τη «βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια» (Sandorf, 2020; Velichkova & Sirakov, 2013).

Μια βιώσιμη λύση μπορεί να είναι η χρησιμοποίηση της νεροφακής, ενός μικρού υδρόβιου φυτού με τεράστιες δυνατότητες για επεξεργασία του νερού εκτροφής με ταυτόχρονη χορήγηση της ως τροφής.

1.2. Κλειστό σύστημα RAS (Recirculating Aquaculture System)

1.2.1. Γενικά

Με τον όρο κλειστό σύστημα εκτροφής (Recirculating Aquaculture System, RAS) εννοούμε εκείνο το σύστημα εκτροφής στο οποίο η παραγωγή των ιχθύων ή των εκάστοτε υδρόβιων οργανισμών γίνεται με την επαναχρησιμοποίηση του νερού παραγωγής (εισερχόμενο φρέσκο νερό 5-20%), με τη βοήθεια μηχανικών και βιολογικών φίλτρων με σκοπό τη διατήρηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του νερού, το βιολογικό έλεγχο των εκτρεφόμενων ειδών και την αποκλειστική χορήγηση ξηράς τροφής, με τελικό στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Με την εφαρμογή του κλειστού συστήματος RAS είναι αναπόφευκτη η αύξηση του κόστους εγκατάστασης και του λειτουργικού κόστους, ενώ παράλληλα απαιτείται και εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό για τη διαχείρισή του (Ebeling & Timmons, 2012). Τα χαρακτηριστικά του νερού όπου αναπτύσσονται και διατρέφονται τα ψάρια είναι τα εξής: η θερμοκρασία, η αλατότητα, η ενεργός οξύτητα (pH), το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο, η περιεχόμενη αμμωνία, η συγκέντρωση σε νιτρικά, νιτρώδη και φωσφορικά ιόντα, τα διαλυμένα σε αυτό στερεά και αέρια συστατικά, η θολερότητα, το χρώμα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το άριστο εύρος τιμών για αυτές τις παραμέτρους δεν είναι το ίδιο για όλα τα είδη ψαριών, ενώ για κάποια είδη δεν είναι γνωστά. Ωστόσο, τα πλέον καθοριστικά από τα παραπάνω για το σύστημα είναι η προσθήκη οξυγόνου, η αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα, η αποβολή της αμμωνίας και η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων από τα παραπάνω (Κλαουδάτος & Κλαουδάτος, 2010; Faisal & Hai, 2018; Ebeling & Timmons, 2012).

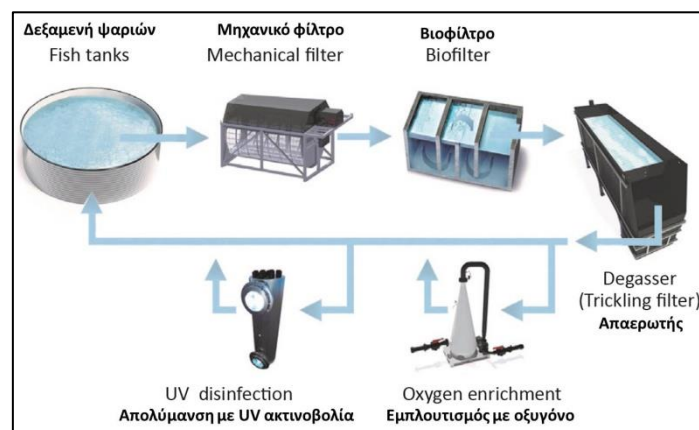
1.2.2. Μέρη του κλειστού συστήματος RAS

Οι ρύποι σε ένα κλειστό σύστημα προέρχονται κυρίως από τα υπολείμματα των τροφών, από τα περιττώματα των ψαριών και από τα παραπροϊόντα του μεταβολισμού της τροφής. Η παραμονή στερεών σωματιδίων μέσα στη δεξαμενή αυξάνει την κατανάλωση οξυγόνου, προκαλεί παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και τελικά σχηματίζεται αμμωνία. Ο ρυθμός σχηματισμού και κατανάλωση αυτών των ρυπαντών διαφέρει από είδος σε είδος ψαριού, όπως επίσης και από το μέγεθος και από την επικρατούσα θερμοκρασία. Ωστόσο, ως προς την ημερήσια κατανάλωση ή παραγωγής δεχόμαστε ότι ισχύουν οι παρακάτω μαθηματικοί τύποι (Timmons κ.ά., 2018):

- $PTAN = 0.03 \cdot \text{kg feed}$ (συμβατικός τύπος για ανόργανο άζωτο)
- $PO_2 = 0.25 \text{ kg O}_2/\text{kg feed} + 0.25 \text{ kg O}_2/\text{kg feed}$
- $PCO_2 = 1.375 \text{ kg} \cdot PO_2$
- $PTSS = 0.25 \cdot \text{kg feed}$

Τα μέρη που απαρτίζουν το RAS (**Εικόνα 2**) είναι απαραίτητα για τον καθαρισμό του νερού και την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων ουσιών, και έπειτα πάλι μέσω αυτών λαμβάνει χώρα η προσθήκη οξυγόνου, το οποίο είναι απαραίτητο για την υγεία και ευζωία των ψαριών. Τα μέρη αυτά είναι τα εξής:

1. Δεξαμενή εκτροφής (fish tanks)
2. Μηχανικό φίλτρο (mechanical filter)
3. Βιοφίλτρο (biofilter)
4. Απαερωτής ή φίλτρα καταιονισμού (degasser)
5. Καθαρό οξυγόνο (oxygen enrichment)
6. Αποστειρωτής με υπεριώδη ακτινοβολία (UV disinfection)



Εικόνα 2. Βασικός σχεδιασμός ενός κλειστού συστήματος RAS (Bregnballe, 2015).

Στην παρούσα εργασία δεν θα ασχοληθούμε με όλα τα μέρη του κλειστού συστήματος RAS και το πως οι διάφορες παραλλαγές τους επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος, αλλά το πως θα επηρεάσει οικονομοτεχνικά μια αλλαγή του βιοφίλτρου από τη νεροφακή και η χορήγησή της ως τροφή για τα ψάρια.

1.2.3. Βιοφίλτρο

Στο κλειστό σύστημα RAS, το βιοφίλτρο απομακρύνει την παραγόμενη NH_3 (τοξική για τα ψάρια), η οποία γίνεται μέσω των βιολογικών διαδικασιών της νιτροποίησης (από αερόβια βακτήρια) και της απονιτροποίησης (από αναερόβια βακτήρια). Η νιτροποίηση γίνεται κάτω από αερόβιες συνθήκες όπου οξειδώνεται η αμμωνία σε νιτρώδη και έπειτα σε νιτρικά. Ακολουθεί η απονιτροποίηση σε αναερόβιες συνθήκες

όπου τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο (N₂). Η στοιχειομετρία των αντιδράσεων αυτών μας δείχνει ότι για κάθε 1 g TAN (ολική αμμωνία, δηλαδή συνολικά η αμμωνία και τα ιόντα αμμωνίου) που μετατρέπεται, καταναλώνονται 4,57 g DO (διαλυμένο οξυγόνο) και παράγονται 5,85 g CO₂.



Υπάρχουν πολλά είδη βιοφίλτρων, το καθένα με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το ιδανικό βιοφίλτρο θα έπρεπε να απομακρύνει το 100% της παραγόμενης αμμωνίας, να είναι οικονομικά προσιτό, να καλύπτει ελάχιστο χώρο, να έχει ελάχιστες απώλειες μέσω τριβής και να απαιτεί ελάχιστη συντήρηση. Ένα τέτοιο βιοφίλτρο όμως δεν υπάρχει. Επίσης, η παραγωγή CO₂ επιβαρύνει το σύστημα (περίπου 37% επιπρόσθετου CO₂ από το βιοφίλτρο) μέσω της επιπρόσθετης ενέργειας που πρέπει να καταβληθεί για να απομακρυνθεί (από τον απαερωτή). Τέλος, ορισμένες μελέτες έχουν επισημάνει την αρνητική επίδραση των βιοφίλτρων στην ποιότητα των παραγόμενων ιχθύων. Για τους παραπάνω κυρίως λόγους, και όχι μόνο, κρίνεται ενδιαφέρουσα η διερεύνηση προς την αντικατάσταση των βιοφίλτρων από υδρόβια φυτά, όπως η νεροφακή.

1.2.4. Διατροφή των ιχθύων και βιωσιμότητα της υδατοκαλλιέργειας στο σύστημα RAS

Η ορθολογική χρήση της ιχθυοτροφής αφορά το 40-70% του συνολικού κόστους μιας εκμετάλλευσης, ενώ είναι επίσης και η κύρια μορφή προέλευσης των αποβλήτων (Tavares, 2008; Daudaa, 2019). Σε μια εντατικοποιημένη υδατοκαλλιέργεια, η τροφή χορηγείται συνήθως υπό μορφή συμπικτών (pellets), που έχουν ως κύρια συστατικά το ιχθυάλευρο και το ιχθυέλαιο. Το 2018, το 88% από τους 179 εκατομμύρια τόνους της ολικής ιχθυοπαραγωγής προοριζόταν για ανθρώπινη κατανάλωση, ενώ το 12% για άλλες χρήσεις, από το οποίο το 80% χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ιχθυάλευρων και ιχθυελαίων (FAO, 2020). Αυτά τα δύο συστατικά θεωρούνται τα πιο αποτελεσματικά από άποψη κόστους και παροχής θρεπτικών συστατικών στα ψάρια (πρωτεΐνες, πολυακόρεστα λιπαρά οξέα, ω-3 και ω-6 λιπαρά οξέα) (FAO, 2014). Τα προβλήματα που προκύπτουν όμως από τη συνεχή χρήση τους είναι ότι αποτελούν τροφή και για άλλα ζωικά είδη (ειδικά τα μικρά πελασγικά ψάρια), αλλά και για τον άνθρωπο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ανταγωνισμός ως προς τη ζήτησή τους. Το γεγονός ότι πάνω από 820 εκατομμύρια ανθρώπων παραμένουν υποσιτιμμένοι (FAO, 2020) δε συμβαδίζει και δε δικαιολογεί το ότι μεγάλο μέρος των ιχθύων (περίπου 75%) που συγκομίζονται από τις θάλασσες σε παγκόσμια κλίμακα

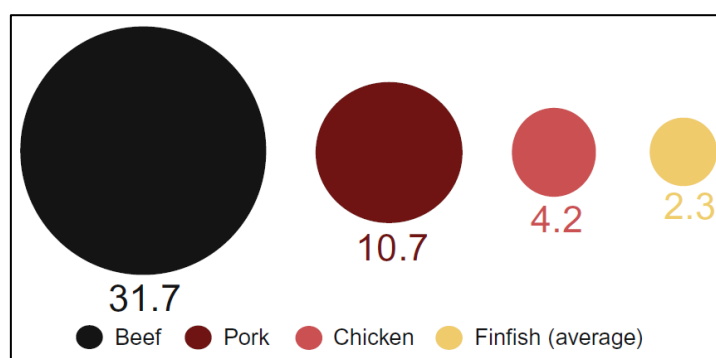
καταλήγει να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τροφών για υδατοκαλλιέργειες. (Culver, 2008; FAO, 2020; Lewandowski, 2018; Sanders, 2018; Faisal & Hai, 2018).

Είναι λοιπόν επιτακτική ανάγκη η μερική ή ολική αντικατάσταση των συστατικών αυτών στο σιτηρέσιο των ιχθύων. Το κύριο μέλημα, εκτός του οικονομικού μέρους, είναι, ωστόσο, η αλλαγή του σιτηρεσίου να μην επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα (κυρίως ως προς τη συγκέντρωση σε πολυακοόρεστα λιπαρά οξέα).

1.2.5. FCR

Ένας τρόπος μέτρησης της αποτελεσματικότητας της τροφής είναι ο δείκτης FCR (δείκτης μετατρεψιμότητας τροφής) (FAO, 2014). Έρευνες έχουν δείξει ότι η μείωση του FCR κατά 30% σε ένα ιχθυοτροφείο μειώνει κατά 20% το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Daudaa, 2019). Τα ψάρια παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς τη βιωσιμότητα σε σχέση με τις άλλες ζωικές τροφές (π.χ. για παραγωγή 1 kg βόειου κρέατος απαιτούνται 31,7 kg σιτηρά ενώ κατά μέσο όρο οι ιχθύες για παραγωγή 1 kg απαιτούν 2,3 kg τροφής (**Εικόνα 3**). Στη χαμηλή τιμή του δείκτη FCR σημαντικό ρολό διαδραματίζει το ιχθυέλαιο και το ιχθυάλευρο. Αρκετές τροφές έχουν προταθεί για να τα αντικαταστήσουν, όπως σόγια (Soybean meal ή SBM) και άλλα, αλλά δεν συνιστούν πλέον πρακτική που συμβάλλει στη βιωσιμότητα των υδατοκαλλιεργειών.

Η νεροφακή, όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω, αντικαθιστώντας μερικώς ή ολικά τις χρησιμοποιούμενες τροφές στα ήδη υπάρχοντα σιτηρέσια, οδηγεί στην επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων (Faisal & Hai, 2018; Skillicorn κ.ά., 1993; Abdel-Fattah El-Sayed, 2019).



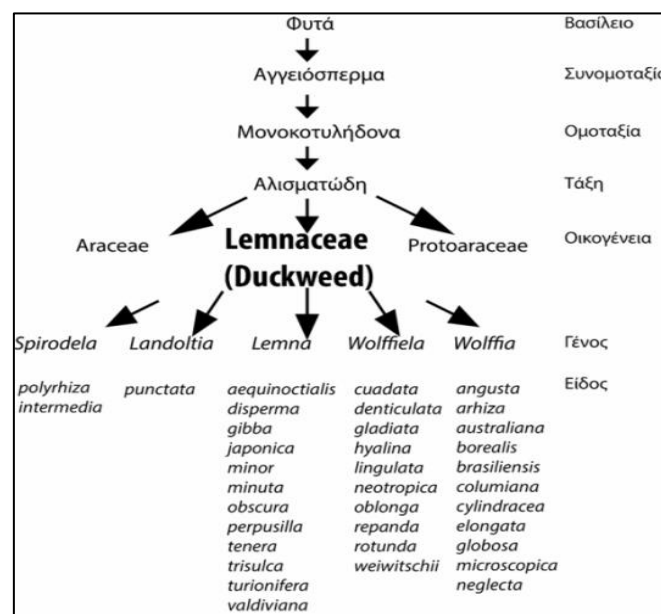
Εικόνα 3. Ικανότητα μετατροπής της τροφής σε κρεοπαραγωγή ζώα (Hall κ.ά., 2011).

1.3. Η νεροφακή

1.3.1. Το φυτό νεροφακή

1.3.1.1. Βοτανική ταξινόμηση της νεροφακής

Οι νεροφακές είναι μονοκότυλα φυτά και βοτανικά ανήκουν στην οικογένεια *Lemnaceae*, η οποία περιέχει περίπου 40 είδη, τα οποία κατατάσσονται σε 4 γένη: *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia* και *Wolffiella*. Τα περισσότερα είδη ανήκουν στα γένη *Lemna*, *Spirodela* και *Wolffia*. Συχνά οι αποικίες της νεροφακής δεν είναι αμιγείς ενός μόνο γένους, αλλά συνυπάρχουν φυτά που προέρχονται από περισσότερα του ενός γένη, π.χ. *Lemna* και *Wolffia*. Το γένος *Lemna* είναι αυτό με τα περισσότερα είδη της οικογένειας *Lemnaceae*. Τα πιο αρχέγονα είδη από τα οποία προήλθαν τα σημερινά είδη θεωρείται ότι είναι τα *Lemna gibba* και *Lemna disperma* (Crawford κ.ά., 2005). Το πιο σημαντικό είδος, στο οποίο κυρίως αντιστοιχεί η εμπειρική ονομασία «νεροφακή» είναι το *Lemna minor* (duckweed) και είναι το μικρότερο όλων των αγγειοσπέρμων φυτών. Η τεράστια εξάπλωση της νεροφακής έχει κάνει την ταξινόμηση της αρκετά περίπλοκη (Arpenroth κ.ά., 2013). Σύμφωνα με κάποιες παραδοχές, με τον όρο νεροφακή αναφερόμαστε σε μία μικρή οικογένεια υδρόβιων φυτών, την οικογένεια *Lemnaceae*, η οποία περιλαμβάνει 5 γένη και 37 είδη (Arpenroth κ.ά., 2013; Sree κ.ά., 2016) (Εικόνα 4). Όπως τα περισσότερα υδρόβια φυτά, έτσι και η νεροφακή περιέχει νερό σε μεγάλο ποσοστό. Ωστόσο, η ξηρά της ουσία περιέχει σημαντικά ποσά πρωτεϊνών, συγκρίσιμα μάλιστα με εκείνα της σόγιας, που αποτελεί κατεξοχήν πρωτεϊνούχο φυτό.



Εικόνα 4. Η συστηματική ταξινόμηση της νεροφακής (Sree κ.ά., 2016).

1.3.1.2. Βιότοποι

Συναντάται σε υφάλμυρα και γλυκά νερά, καθώς και λασπόνερα, που είναι πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία, κυρίως άζωτο, φώσφορο και κάλιο. Είναι πιθανό, επομένως, να τα συναντήσουμε σε λίμνες, κανάλια, χαντάκια και ορυζώνες (Escobar κ.ά., 2017). Για την καλλιέργειά της απαιτείται αγροτεμάχιο που προσομοιάζει με λίμνη, ήτοι με αρκετή ποσότητα νερού, το οποίο ιδανικά πρέπει να περιέχει μεγάλη ποσότητα θρεπτικών ουσιών οι οποίες παρέχονται είτε μέσω της, φυσικώς υπάρχουσας, οργανικής ουσίας είτε μέσω της εφαρμογής λίπανσης. Συχνά, νερά που προέρχονται από απόβλητα γεωργικών βιομηχανιών μπορούν να αποτελέσουν άριστη πηγή θρεπτικών στοιχείων για τη νεροφακή. Έχει παρατηρηθεί ότι τα οργανικά υπολείμματα και τα ανόργανα θρεπτικά συστατικά ευνοούν την ανάπτυξη των φυτών νεροφακής (Guha, 1997). Σε έλλειψη ή ανισορροπία στα επίπεδα θρεπτικών, τα φυτά της νεροφακής αναπτύσσονται με αργότερους ρυθμούς (Escobar κ.ά., 2017). Η νεροφακή δεν επιβιώνει σε ταχέως κινούμενα νερά και σε νερά που δεν είναι προστατευμένα από ανέμους. Πιο συγκεκριμένα, η νεροφακή δεν επιβιώνει σε ρέοντα νερά όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από 0,3 m/sec.

1.3.1.3. Μορφολογία

Τα φυτά της νεροφακής αποτελούν μία από τις απλούστερες μορφές αγγειοσπέρμων, ανθοφόρων φυτών και είναι μικρά και εύθραυστα (Ekperusi κ.ά., 2019; Ziegler κ.ά., 2015). Έχοντας διατηρήσει, μέσω φυσικής επιλογής, μόνο τις απαραίτητες δομές για να επιβιώνουν σε υδάτινα περιβάλλοντα (Skillicorn κ.ά., 1993), στερούνται φύλλων και βλαστών ή άλλων εξειδικευμένων σχηματισμών, διαθέτουν ρίζα (rootlet) που εκτείνεται προς τα κάτω, και μικρές, φυλλοειδείς, πεπλατυσμένες προεκτάσεις σε σχήμα οβάλ (fronds), τα οποία είναι ενδιάμεσες δομές μεταξύ φύλλων και στελεχών (Goopy & Murray, 2003; Ziegler κ.ά., 2015). Πιο συγκεκριμένα, το φυτό της νεροφακής αποτελείται από ένα ωοειδές φύλλο (frond), ανοιχτού πράσινου χρώματος, μήκους 1-20 mm και πλάτους 0,6-5 mm, στο οποίο διακρίνονται 3-5 νευρώσεις οι οποίες το χωρίζουν σε 2-4 ευδιάκριτες περιοχές. Η φυτική βιομάζα τους αποτελείται κυρίως από χλωρεγχυματικά κύτταρα, με εκτεταμένους διακυτταρικούς χώρους, μέσα στους οποίους περιέχεται αρκετή ποσότητα αέρα, παρέχοντας έτσι πλευστότητα στο φυτό, ενώ το πάνω μέρος της επιδερμίδας είναι πλούσιο σε χιτίνη (cutin) και έτσι διατηρείται υδρόφοβο. Επιπλέον, μιας και απαιτείται λίγος στηρικτικός ιστός για αυτές τις φυλλοειδείς πλωτές μονάδες, η περιεκτικότητά τους σε ίνες είναι μικρότερη από 5% (Escobar κ.ά., 2017).

Τα είδη του γένους *Spirodela* εμφανίζουν τα μεγαλύτερα φύλλα-φυτά (fronds), περίπου 20 mm, ενώ η διάμετρος στα είδη του γένους *Wolffia* δεν ξεπερνά τα 2 mm. Όσον αφορά στα είδη του γένους *Lemna*, εμφανίζουν ενδιάμεσο μέγεθος (6-8 mm) (Skillicorn κ.ά., 1993). Κάθε φύλλο-φυτό διαθέτει συνήθως ριζίδια, μήκους 1-2 cm, τα οποία βοηθούν κυρίως στη σταθεροποίηση του φύλλου-φυτού πάνω στο νερό. Ωστόσο, το μήκος των ριζιδίων εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και μπορεί να φτάσει έως 14 cm, ενώ η ύπαρξη σε αυτά χλωροπλαστών, τα καθιστά φωτοσυνθετικά ενεργά. Τα φυτά της νεροφακής αναπτύσσονται και εντός του νερού, με το βάθος να εκτείνεται από μερικά μόνο χιλιοστά έως 3 m (Escobar κ.ά., 2017). Το υδρόβιο αυτό φυτό επιπλέει σχηματίζοντας παχύ στρώμα λόγω της δυνατότητας του φυτού να συσσωματώνεται σε αποικίες στην επιφάνεια του νερού (Ekerus κ.ά., 2019) (Εικόνα 5).



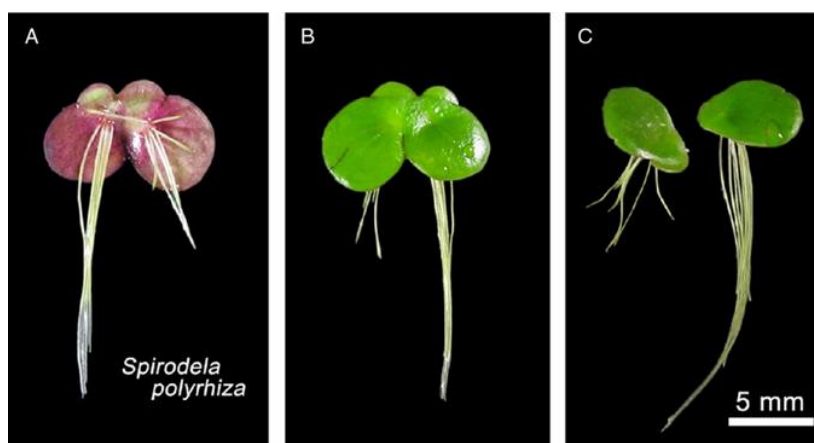
Εικόνα 5. Λίμνη που περιέχει πυκνό στρώμα νεροφακής, δύο ειδών (*Lemna minor* και *Spirodela polyrrhiza*) (αριστερά). Φυλλοειδείς προεκτάσεις της *Lemna minor* (δεξιά) (Kutschera & Niklas, 2014).

1.3.1.4. Αναπαραγωγή

Αν και ανθοφόρο φυτό, η νεροφακή αναπαράγεται πρωτίστως μέσω αγενούς πολλαπλασιασμού (vegetative budding) και μονάχα περιστασιακά έχουμε παραγωγή ανθέων και σπόρων (Escobar κ.ά., 2017). Ειδικότερα, η αναπαραγωγή γίνεται βλαστητικά, μέσω της ανάπτυξης θυγατρικών φυλλαρίων από οφθαλμούς, οι οποίοι εκπύσσονται σε ορισμένα σημεία του εκάστοτε μητρικού φύλλου-φυτού (Gaigher & Short, 1986). Τα θυγατρικά φύλλα-φυτά αρχικά παραμένουν προσκολλημένα στο μητρικό φύλλο-φυτό, δίνοντας την εντύπωση ότι το κάθε φυτό αποτελείται από πολλά φύλλα (Εικόνα 6). Ένα μητρικό φύλλο-φυτό μπορεί να παράγει μέχρι και 20 θυγατρικά φύλλα κατά τη διάρκεια του βιολογικού του κύκλου, ο οποίος μπορεί να διαρκέσει από 10 ημέρες έως και μερικές εβδομάδες. Το θυγατρικό φύλλο-φυτό

επαναλαμβάνει κι αυτό με τη σειρά του τον ίδιο κύκλο αναπαραγωγής. Τα θυγατρικά φύλλα-φυτά είναι μικρότερα σε μάζα και παράγουν λιγότερα θυγατρικά φύλλα-φυτά από τα μητρικά (Gupta & Prakash, 2013). Αυτό οφείλεται στη μείωση του αριθμού των κυττάρων.

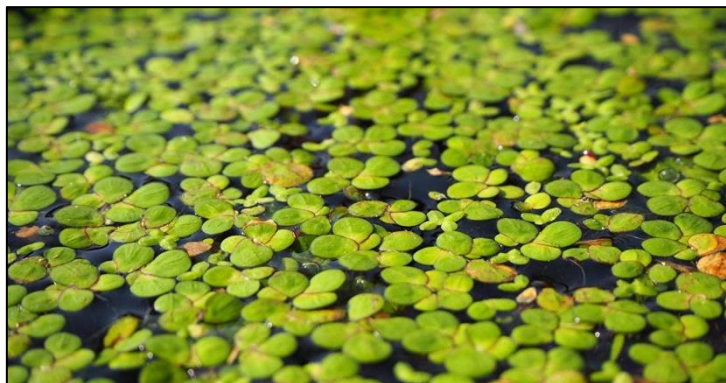
Αυτός ο τρόπος αναπαραγωγής ευθύνεται και για την τεράστια εξάπλωση των πληθυσμών νεροφακής σε παγκόσμιο επίπεδο (Kutschera & Niklas, 2014). Η ανάπτυξη και εξάπλωση της *Lemna minor* εμφανίζει κύκλους γήρανσης και αναζωογόνησης υπό σταθερή διαθεσιμότητα θρεπτικών και σταθερές κλιματικές συνθήκες. Ο χρόνος διπλασιασμού της νεροφακής είναι 1,4 μέρες (Ekerusi κ.ά., 2019; Frick, 1985), με άλλα λόγια είναι το γρηγορότερα αναπτυσσόμενο φυτό από όλα τα αγγειόσπερμα. Οι Kutschera & Niklas (2014) κατέγραψαν διπλασιασμό της βιομάζας σε περίπου 28 ώρες.



Εικόνα 6. Η κάτω (A) και άνω (B) επιφάνεια των φυλλοειδών προεκτάσεων της *Spirodela polyrrhiza*. Η φυτική ανάπτυξη της *Spirodela polyrrhiza* με αγενή πολλαπλασιασμό, με διαχωρισμό των θυγατρικών προεκτάσεων (C) (Kutschera & Niklas, 2014).

Οι αναπαραγωγικοί ρυθμοί της, ωστόσο, εξαρτώνται από την παρουσία θρεπτικών συστατικών (Escobar κ.ά., 2017). Το μικρό μέγεθος και η ραγδαία ανάπτυξη της νεροφακής αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα συμβιβασμού μεταξύ μεγέθους και αναπαραγωγικής ικανότητας. Μικρού μεγέθους φυτά αναπτύσσονται και αναπαράγονται γρηγορότερα συγκριτικά με φυτά μεγαλύτερης βιομάζας. Εργαστηριακά, η νεροφακή μπορεί να καλλιεργείται και να μεγαλώνει επ'άπειρον, παράγοντας μεγάλο αριθμό θυγατρικών φύλλων-φυτών στη διάρκεια της ζωής της, εφόσον παρέχονται θρεπτικά στοιχεία (Kutschera & Niklas, 2014; Gupta & Prakash, 2013) (**Εικόνα 7**). Η συχνή απομάκρυνση (συγκομιδή) φυτών από την επιφάνεια του νερού ευνοεί την συνέχεια της αύξησης με εκθετικό ρυθμό.

Η Rejmankova (1979) αναφέρει απόδοση σε ξηρή ουσία 3,54 g/m²/ημέρα, για αυτοφυή καλλιέργεια και 7,09 g/m²/ημέρα για υπαίθρια καλλιεργούμενη δεξαμενή, οι οποίες αντιστοιχούν σε 7,5-8 τόνους ξηράς ουσίας ανά εκτάρια εφόσον βέβαια υπάρχει σταθερή παροχή θρεπτικών στοιχείων, ο βαθμός συνωστισμού δεν είναι περιοριστικός παράγοντας και η συγκομιδή είναι συχνή.



Εικόνα 7. Φυτική αποικία φύλλων-φυτών νεροφακής (Kutschera & Niklas, 2014).

1.3.2. Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Πολλοί περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του νερού, το pH και η συγκέντρωση σε θρεπτικές ουσίες, επηρεάζουν την επιβίωση και την ανάπτυξη των φυτών της νεροφακής. Άλλοι παράγοντες είναι η παρουσία στο νερό τοξινών, ο συνωστισμός των φυτών λόγω υπερβολικής ανάπτυξης, ο ανταγωνισμός με άλλα φυτά κ.ά. Αυτό που είναι βέβαιο, είναι ότι τα είδη νεροφακής αποτελούν ευπροσάρμοστες μορφές φυτών όσον αφορά στην επιβίωση, με περισσότερες απαιτήσεις και αναλογίες που πρέπει να τηρηθούν για να επέλθουν μέγιστοι ρυθμοί ανάπτυξης. Η αντοχή τους φτάνει σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας, pH, αγωγιμότητας, διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου, ωστόσο για καθένα από αυτά υπάρχουν ιδανικά εύρη τιμών για μέγιστη ανάπτυξη και ιδανικοί συνδυασμοί συνθηκών και παραγόντων (Hassan & Chakrabarti, 2009).

1.3.2.1. Θερμοκρασία

Η νεροφακή δύναται να επιβιώσει και να αναπτυχθεί σε πολλές κλιματικές ζώνες, με εξαίρεση τις πολικές περιοχές (θερμοκρασία < 0°C) καθώς και την έρημο. Τα περισσότερα είδη απαντώνται σε τροπικές και εύκρατες περιοχές. Στην έρημο αλλά και σε πολύ υγρές περιοχές, σπάνια αναπτύσσονται φυτά νεροφακής (Landolt & Crawford, 2006). Παρόλο που αρκετά είδη μπορούν να επιβιώσουν σε ακραίες συνθήκες, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης λαμβάνει χώρα σε θερμές περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια (Skillicorn κ.ά., 1993).

Τα φυτά της νεροφακής αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 6 και 33°C (Leng κ.ά., 1995), ωστόσο οι ιδανικές θερμοκρασίες για την ανάπτυξη των περισσότερων ειδών κυμαίνονται μεταξύ 17,5 και 30°C. Κάτω από τους 17°C έχουμε ανάπτυξη αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, τα φυτά λαμβάνουν μια ειδική μορφή, αμυλώδους κυρίως σύστασης, μέσω της οποίας επιβιώνουν, και η οποία ονομάζεται turion. Υπό τέτοιες συνθήκες, ο ρυθμός βλαστητικής ανάπτυξης μειώνεται σημαντικά έως ότου η θερμοκρασία αυξηθεί εκ νέου. Σε νερό με θερμοκρασία άνω των 35°C τα φυτά αδυνατούν να επιβιώσουν (Lasfar κ.ά., 2007). Οι Culley κ.ά. (1981) καθώς και οι Gaigher & Short (1986), παρατήρησαν ότι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης έλαβε χώρα όταν η θερμοκρασία κυμαίνονταν από 22 έως 26°C. Αυτές οι θερμοκρασίες επηρεάζονται και από την ένταση του φωτός, καθώς όταν αυξάνεται η δεύτερη έχουμε αύξηση και των ρυθμών ανάπτυξης στο εύρος θερμοκρασιών 10-30°C (Hassan & Chakrabarti, 2009).

Διαφορετικές θερμοκρασίες επιδρούν διαφορετικά στο ρυθμό ανάπτυξης, το ξηρό βάρος και το πρωτεϊνικό περιεχόμενο των φυτών της νεροφακής. Ο ρυθμός ανάπτυξης όπως αναφέρθηκε για τη *Lemna minor* είναι μέγιστος σε θερμοκρασίες κοντά στους 26°C, όμως το ξηρό βάρος αυξάνεται σε θερμοκρασίες 12,5-27,5°C. Με άλλα λόγια η αύξηση του ξηρού βάρους μπορεί να είναι βέλτιστη σε διαφορετική θερμοκρασία από αυτή που μεγιστοποιεί το ρυθμό ανάπτυξης. Όσον αφορά την παραγωγή πρωτεΐνης, έχειδειχθεί ότι κατά μέσο όρο η πρωτεϊνική σύσταση των φυτών είναι 1,7-3,1 φορές μεγαλύτερη στους 23,9°C από ότι στους 18,3°C, υποδεικνύοντας ότι μετατοπίζοντας χρονικά την καλλιέργεια σε περίοδο που επικρατεί η κατάλληλη θερμοκρασία, είναι δυνατό να αυξήσουμε τη σύσταση των φυτών σε πρωτεΐνη (Ruigrok, 2015).

Τέλος, η αντοχή σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας αλλά και η άριστη θερμοκρασία ανάπτυξης, διαφέρει όχι μόνο μεταξύ των ειδών νεροφακής αλλά και μεταξύ κλώνων.

1.3.2.2. Ηλιοφάνεια (ένταση φωτός)

Ως προς την ηλιοφάνεια (ένταση φωτός), όσο αυτή αυξάνεται, αυξάνεται και η βλαστητική ανάπτυξη των φυτών, εφόσον όμως η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30°C. Υπό άριστες συνθήκες έντασης φωτός, η βέλτιστη φωτοπερίοδος για τη *Lemna minor* έχει βρεθεί ότι είναι 13 ώρες (Lasfar κ.ά., 2007).

1.3.2.3. Ενεργός οξύτητα (pH)

Η επίδραση του pH, στη νεροφακή, είναι περίπλοκη διαδικασία, καθώς η διαλυτότητα και διαθεσιμότητα κάθε θρεπτικού στοιχείου διαφέρει ανάλογα με το pH (Ruigrok, 2015). Η νεροφακή συγκαταλέγεται στα φυτά με μεγάλο εύρος ανοχής σε αυτό, αν και αυτό ποικίλει από είδος σε είδος. Παρουσιάζει καλά επίπεδα ανάπτυξης σε pH 5-9, αν και σε διάφορες μελέτες το εύρος αυτός φαίνεται να είναι ακόμα μεγαλύτερο και συγκεκριμένα 3-10. Σε τιμές pH από 6,5 έως 7,5 παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (Culley κ.ά., 1981; Hassan & Chakrabarti, 2009).

1.3.2.4. Άζωτο

Γενικά, η θερμοκρασία και η ηλιοφάνεια επηρεάζουν πολύ περισσότερο την ανάπτυξη των φυτών από ότι η συγκέντρωση των διάφορων θρεπτικών στοιχείων στο νερό. Αν η θερμοκρασία και η ηλιοφάνεια είναι ευνοϊκές, τότε ακόμη και με ελάχιστη ποσότητα φωσφόρου και αζώτου, η ανάπτυξη θα είναι πολύ γρήγορη (Hassan & Chakrabarti, 2009). Ωστόσο, με την εφαρμογή λίπανσης μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ η ποσότητα της πρωτεΐνης που περιέχεται στα φυτά. Οι Culley κ.ά. (1981) αναφέρουν ότι στην περίπτωση που στόχος είναι η ταχεία βλαστητική ανάπτυξη και η μεγάλη απόδοση σε πρωτεΐνη, δεν θα πρέπει η συγκέντρωση του αζώτου στο νερό να είναι μικρότερη από 20-30 mg/l.

1.3.2.5. Φώσφορος και Κάλιο

Μετά το άζωτο, τα πιο βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη της νεροφακής είναι ο φώσφορος και το κάλιο. Ωστόσο, ακόμα και με μικρές ποσότητες φωσφόρου και καλίου μπορεί να επιτευχθεί εξαιρετικά γρήγορη αύξηση των φυτών. Οι απαιτήσεις των φυτών νεροφακής σε φώσφορο κυμαίνονται μεταξύ 0,003 και 1,75 mM, ανάλογα με το είδος, ενώ σε πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία νερό, η νεροφακή προσλαμβάνει έως και 1,5% του βάρους της σε φώσφορο (Goopy & Murray, 2003). Ως μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση φωσφόρου θεωρείται αυτή των 154 mg/L (Culley κ.ά., 1978). Πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του φυτού δεν αυξάνεται απαραίτητα και η πρόσληψη φωσφόρου. Αντιθέτως, ο ρυθμός πρόσληψης καθορίζεται σημαντικά από τα εσωτερικά επίπεδα φωσφόρου που διαθέτει το φυτό, τα οποία με τη σειρά τους φαίνεται να αυξάνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και σύντομες φωτοπεριόδους (Paterson κ.ά., 2020). Αναφορικά με το κάλιο, το εύρος των συγκεντρώσεων του στο νερό ώστε να υποστηρίξει την ανάπτυξη των *Lemnaceae* είναι 0,5-100 mg/L (Hassan & Chakrabarti, 2009) και επίσης οι ανάγκες σε αυτό

εξαρτώνται από το είδος της νεροφακής καθώς και από την ένταση του φωτός (Goopy & Murray, 2003).

1.3.2.6. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι καθοριστική για την παραγωγή βιομάζας, επηρεάζοντας ποικίλες βιοχημικές και φυσιολογικές διεργασίες στα φυτά (Iqbal & Javed, 2017).

Σε στάσιμα νερά αγωγιμότητα ηλεκτρολυτών σε τιμές 400-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έχει βρεθεί ιδανική για τα είδη *Lemna minor* και *Lemna gibba* ώστε αυτά να παράγουν τη μέγιστη ποσότητα βιομάζας, ενώ για άλλα είδη το εύρος αυτός φαίνεται μεγαλύτερο (650-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

1.3.2.7. Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Το είδος *Lemna minor* απαιτεί συγκέντρωση CO₂ τουλάχιστον 65 ppm, ενώ σε συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικού αέρα (330 ppm) παρουσιάζει πολύ πιο γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης. Σε πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (9000 ppm) δεν αυξάνεται περαιτέρω ο ρυθμός ανάπτυξης, αλλά το ξηρό βάρος των φυτών. Η νεροφακή προσλαμβάνει CO₂ και από το καλλιεργητικό μέσο (νερό), ενώ όταν αυτό δεν είναι αρκετό το προσλαμβάνει απευθείας από τον αέρα, κάτι που όμως καθυστερεί την ανάπτυξή της (Ruijgrok, 2015).

1.3.2.8. Πυκνότητα φυτών

Η πυκνότητα των φυτών νεροφακής, δηλαδή η φυτική βιομάζα που έχει επικαλύψει ένα τετραγωνικό μέτρο νερού, αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα, καθώς η υψηλή πυκνότητα είναι ανασταλτική για την ανάπτυξη (Lasfar κ.ά., 2007). Η ιδανική πυκνότητα διαφέρει μεταξύ των διαφόρων ερευνών ανάλογα με την πειραματική διαδικασία που έχει ακολουθηθεί. Ως ιδανική πυκνότητα έχει αναφερθεί η 1600 g νωπού βάρους/m² (Lasfar κ.ά., 2007), η 1250 g νωπού βάρους/m² (Koles κ.ά., 1987) καθώς και η 400-800 g νωπού βάρους/m² (Skillicorn κ.ά., 1993).

1.3.3. Θρεπτική αξία

Τα φυτά της νεροφακής περιέχουν υψηλής ποιότητας πρωτεΐνη (De Beukelaar, 2017), καθώς η πρωτεϊνική σύσταση της άγριας νεροφακής, που αναπτύσσεται σε φτωχό σε θρεπτικά στοιχεία νερό, είναι 15-25% κατά βάρος, ενώ σε ιδανικές συνθήκες καλλιέργειας φτάνει το 35-43%. Εξαιρέση αποτελεί η τρυπτοφάνη, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί μόνο σε ίχνη (Russoff κ.ά., 1980). Η νεροφακή (duckweed, *Lemna minor*), μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης για τη διατροφή των ψαριών,

μιας και το πρωτεϊνικό της προφίλ (**Εικόνα 8 και 9**) προσομοιάζει αρκετά αυτό των προϊόντων ζωικής προέλευσης αλλά και της σόγιας.

Serving Size 1 scoop (8g)			
	Amount per serving	%	
Calories	35		
Total Fat	0.5 g		
Total Carbohydrate	3 g		
Dietary Fiber	3 g		
Protein	4 g		
Vitamin A	157 mcg		
Vitamin B12	0.35 mcg		
Vitamin K	134 mcg		
Folate	9 mcg DFE		
Calcium	104 mg		
Iron	3.8 mg		
Phosphorus	45.1 mg		
Magnesium	26.4 mg		
Zinc	0.7 mg		
Sodium	25 mg		
Lutein	5.6 mg		
Zeaxanthin	0.6 mg		
Polyphenols	26.0 mg GAE		
Omega-3	0.3 g		
Chlorophyll	76.7 mg		
			(Average milligrams per serving naturally occurring)
			Alanine 385.6 mg**
			Arginine 441.6 mg**
			Aspartic Acid 611.2 mg**
			Cystine 79.2 mg**
			Glutamic Acid 727.2 mg**
			Glycine 327.2 mg**
			Histidine 152 mg**
			Isoleucine 331.2 mg**
			Leucine 600.8 mg**
			Lysine 456.8 mg**
			Methionine 142.4 mg**
			Phenylalanine 384.8 mg**
			Proline 287.2 mg**
			Serine 281.6 mg**
			Threonine 297.6 mg**
			Tryptophan 186.4 mg**
			Tyrosine 267.2 mg**
			Valine 405.6 mg**

Εικόνα 8. Διατροφική αξία και πρωτεϊνικό προφίλ νεροφακής (internet source).

	Τόνοι ανά στρέμμα/έτος (%)	Ακατέργαστη Πρωτεΐνη (%)	Λιπαρά (%)	Ίνες (%)	Στερεό Υπόλειμμα (%)	Σχετική παραγωγή πρωτεΐνης ανά έτος ανά στρέμμα
Νεροφακή (ξηρή)	7.85	37.0	5.0	7.5	11.0	100.0
Σόγια (ξηρός σπόρος)	0.71	41.7	19.2	5.8	5.4	10.2
Βαμβάκοςπορος (ξηρός)	0.34	24.9	24.7	18.2	3.8	2.9
Αράπικο φιστίκι (αποξηραμένο)	0.70-1.39	23.6	37.9	21.1	3.2	5.7-11.3

Εικόνα 9. Σύγκριση νεροφακής και άλλων φυτών ως προς ορισμένα διατροφικά χαρακτηριστικά (Hillman & Culley, 1978).

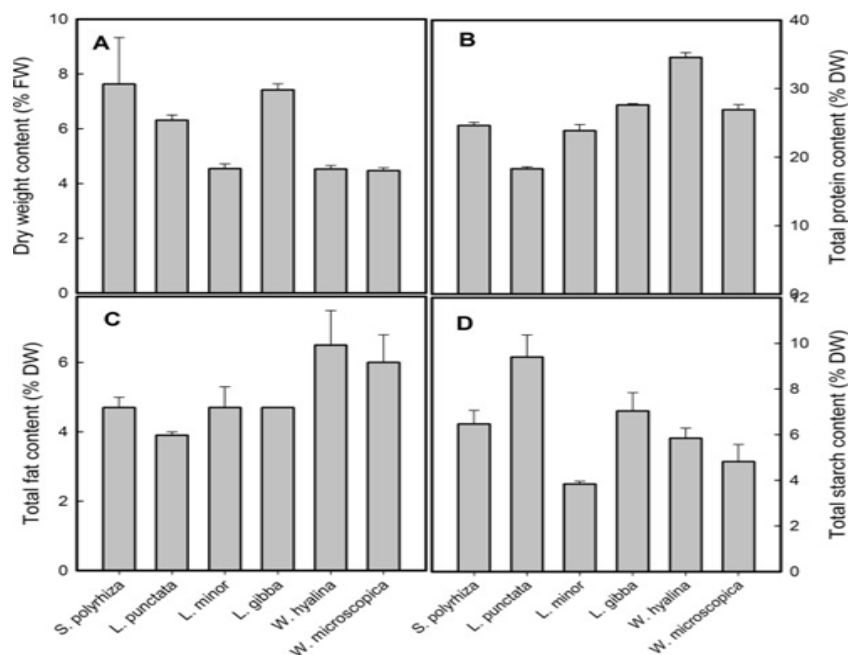
Περιέχει 400 g πρωτεΐνης /kg ξηρού βάρους, εκ των οποίων τα 6,9 g αντιστοιχούν στη λυσίνη, ποσό υψηλότερο από το αντίστοιχο των περισσότερων φυτικών πρωτεϊνών. Επίσης, το χαμηλό περιεχόμενο σε ίνες αλλά και η μικρή περιεκτικότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων σε λιγνίνη, καθιστούν τη νεροφακή εύπεπτη όχι μόνο από τα ψάρια, αλλά ακόμα και από μονογαστρικά ζώα. Την καταλληλότητά της για τη σίτιση των ψαριών ενισχύει η παρουσία υψηλών ποσοτήτων ιχνοστοιχείων και χρωστικών, κυρίως ξανθοφυλλών και καροτενοειδών (Porath κ.ά., 1979; Chaturvedi κ.ά., 2003; Bornali, 2004; Haque, 2005; Tao κ.ά., 2013; Leng κ.ά., 1995). Η σόγια (soybean, *Glycine max*) αν και αποτελεί άριστη τροφή για τα ψάρια, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Περιέχει πολλούς

αντιδιατροφικούς (αντιδιδαιτητικούς) παράγοντες, όπως παρεμποδιστές του ενζύμου θρυψίνη, φυτικό οξύ, τους ολιγοσακχαρίτες ραφφινόζη και σταχυόζη, σαπωνίνες, λιποξειδάσες και φυτοοιστρογόνα (Goetz, 2012).

Επιπρόσθετα, η νεροφακή έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε άμυλο, κάτι που την καθιστά σημαντικό διατροφικό προϊόν για αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η κύρια τροφή τους είναι βασισμένη σε αμυλούχες τροφές και επιζητούν τροφές πλουσιότερες σε πρωτεΐνη. Θα μπορούσε, παρόλα αυτά, κάλλιστα να προστεθεί και στη διατροφή πληθυσμών βιομηχανικών χωρών, πιο ανεπτυγμένων οικονομικά (Arpenroth κ.ά., 2017).

Ως προς τα λιπαρά συστατικά, η νεροφακή είναι πολύ πλούσια σε αλινολενικό οξύ και, συνεπώς, χαρακτηρίζεται από χαμηλή αναλογία ω-6/ω-3 λιπαρών, κάτι που θα μπορούσε να συμβιβάσει τις μη επιθυμητές υψηλές αναλογίες που συναντώνται στη δυτική διατροφή. Στην **εικόνα 10** παρουσιάζεται η σύσταση μερικών ειδών νεροφακής σε λιπαρά, πρωτεΐνες και άμυλο. Επιπρόσθετα, η σχετικά υψηλή σύσταση σε μεταλλικά ιόντα, όπως καλίου και σιδήρου, οι χαμηλές τιμές ιόντων νατρίου, τα υψηλά επίπεδα σε καροτενοειδή, φυτοστερόλες και αντιοξειδωτικά, καθιστούν τη νεροφακή ακόμα πιο ελκυστική για χρήση ως μια υγιεινή ανθρώπινη τροφή (Markou κ.ά., 2018).

Στα φυτά της οικογένειας *Lemnaceae* απαντώνται και άλλα σημαντικά θρεπτικά συστατικά, όπως βιταμίνες. Οι Landolt & Kandeler (1987) παρατήρησαν ότι η νεροφακή περιέχει αξιόλογες ποσότητες από τις βιταμίνες A, B1, B2, B6, C, E και PP. Ειδικότερα, η περιεκτικότητα σε βιταμίνη E (20-40ppm) και PP (40-60ppm) είναι ιδιαίτερα υψηλή (Muzaffarou κ.ά., 1968). Εν κατακλείδι, αφού το πρωτεϊνικό προφίλ της νεροφακής προσεγγίζει αρκετά αυτό των προϊόντων ζωικής προέλευσης (όπως το κρέας, τα ψάρια, τα αυγά και τα γαλακτοκομικά προϊόντα), μπορεί να αποτελέσει ένα αποτελεσματικό συμπλήρωμα διατροφής και του ανθρώπου, ειδικά σε χώρες όπου οι άνθρωποι υποφέρουν από υποσιτισμό.



Εικόνα 10. Βασικά συστατικά σε έξι είδη νεροφακής. (Α) Ξηρό βάρος (%), (Β) Ολικό περιεχόμενο σε πρωτεΐνες, (C) Ολικό περιεχόμενο σε λιπαρά οξέα, (D) Ολικό περιεχόμενο σε άμυλο. (B,C,D) % περιεχόμενα ως προς την ξηρή μάζα (Arpenroth κ.ά., 2017).

1.3.4. Παραγωγικότητα

Όταν η νεροφακή αναπτύσσεται σε συνθήκες αφθονίας θρεπτικών συστατικών, οι πρωτεΐνες συνιστούν το 30-40% της περιεκτικότητας σε ξηρά ουσία, με τη μέση απόδοση σε πραγματικές συνθήκες να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 τόνων ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος. Στα δεδομένα που ήδη υπάρχουν, σε παγκόσμια κλίμακα, αναφέρονται τιμές παραγωγικότητας τόσο χαμηλές (2 τόνοι ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος) όσο και υψηλότερες (πάνω 50 τόνοι ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος). Αυτό το μεγάλο εύρος διακύμανσης οφείλεται σε διαφορές μεταξύ των ειδών νεροφακής, των επικρατούντων κλιματικών συνθηκών, το μέγεθος της καλλιεργούμενης περιοχής, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών καθώς επίσης και από τον τρόπο διαχείρισης της όλης εκμετάλλευσης από τον εκάστοτε παραγωγό. Έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες αποδόσεις επιτυγχάνονται σε βραχύβια και μικρής κλίμακας (κυρίως πειραματικά) συστήματα, των οποίων η διαχείριση γίνεται κάτω από συνθήκες ανάπτυξης που είναι σε μεγάλο βαθμό ελεγχόμενες. Ωστόσο, τέτοιες συνθήκες δεν είναι αντιπροσωπευτικές αυτών που επικρατούν καθόλη τη διάρκεια του έτους στις συνήθεις εκμεταλλεύσεις. Όπως επισημαίνεται παραπάνω, αν θεωρήσουμε δεδομένο ότι εξασφαλίζεται επαρκής ποσότητα θρεπτικών συστατικών και νερού, μπορεί να

θεωρηθεί ρεαλιστική μια ετήσια απόδοση σε ξηρά ουσία της τάξης των 10-30 τόνων /εκτάριο /έτος.

Οι Culley κ.ά. (1978) αναφέρουν ότι η βέλτιστη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα υπό φυσικές συνθήκες και σε θερμό κλίμα δεν ξεπερνά τους 25 τόνους ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος. Οι Edwards κ.ά. (1992) σημειώνουν ότι η παραγωγικότητα της τάξης των 20 τόνων ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος είναι μια πιο ρεαλιστική τιμή για συστήματα που διαχειρίζονται ορθά στις τροπικές περιοχές. Δεδομένης μιας μέσης απόδοσης 17,6 τόνων ξηρού βάρους /εκτάριο /έτος, και συγκέντρωσης της πρωτεΐνης ίσης με το 37% του ξηρού βάρους, δύναται να αποκτηθεί περίπου 6,5 τόνοι πρωτεΐνης /εκτάριο /έτος. Αυτή η απόδοση σε πρωτεΐνη ανά εκτάριο είναι κατά μακράν υψηλότερη από εκείνη των περισσότερων ειδών καλλιεργούμενων φυτών, και περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της σόγιας (Gijzen & Khondker, 1997). Αυτή η αξιοσημείωτη επίδοση της νεροφακής αποδίδεται όχι μόνο στον υψηλό ρυθμό ανάπτυξης της και την περιεκτικότητά της σε πρωτεΐνη, αλλά και στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται το σύνολο της βιομάζας της νεροφακής σε αντίθεση με τα περισσότερα καλλιεργούμενα είδη από τα οποία χρησιμοποιείται μόνο ο σπόρος (Gijzen & Khondker, 1997).

1.4. Εφαρμογές και αξιοποίηση της νεροφακής

1.4.1. Γενικά

Δεδομένων όλων αυτών των χαρακτηριστικών της, πρέπει να τονιστεί ότι η νεροφακή παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον σε θεωρητικό επίπεδο φυσιολογίας, εξελικτικής βιολογίας και γενετικής (Kutschera & Briggs, 2013), με τον ίδιο τρόπο που έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλοι οργανισμοί ως γενετικά και βιοχημικά μοντέλα, όπως έντομα του γένους *Drosophila* και ζυμομύκητες, λόγω της ταχείας και χαμηλού κόστους εργαστηριακής καλλιέργειάς τους (Escobar κ.ά., 2017). Επιπλέον, η γρήγορη αύξηση των κλώνων και η απλή καθαρή καλλιέργεια, καθιστούν τη νεροφακή κατάλληλο εργαστηριακό υποκείμενο για τη μελέτη διάφορων ζητημάτων όπως η φωτοπερίοδος, η μορφογένεση των φύλλων, η τοξικολογία και οι επιπτώσεις της ακτινοβολίας UV στα φυτά (Hillman, 1961).

Η σημασία της είναι επίσης μεγάλη και σε πρακτικό επίπεδο, μιας και μπορεί να βρει ποικίλες εφαρμογές, όπως ως τροφή, για παραγωγή βιοκαυσίμου, για βιοαποκατάσταση μολυσμένων νερών και αποβλήτων καθώς και για άλλες χρήσεις (Zhao κ.ά., 2012).

Η ικανότητα της νεροφακής να απορροφά μεγάλες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων από τα νερά στα οποία αναπτύσσεται έχει αποδειχθεί από πολλούς ερευνητές μέχρι σήμερα (Cheng & Stomp, 2009; Leng κ.ά., 1995; Leng, 1999; van der Spiegel κ.ά., 2013; Xu κ.ά., 2012). Λόγω αυτής της ικανότητάς της, η νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση υποβαθμισμένων υδάτων, απόνερων και αποβλήτων (Journey κ.ά., 1994; Leng κ.ά., 1995; Leng, 1999; Van der Spiegel κ.ά., 2013). Μία εφαρμογή είναι η καλλιέργεια νεροφακής σε νερά όπου παρατηρείται το φαινόμενο του ευτροφισμού, με στόχο τη βιοεξυγίανση αυτών των νερών. Έχει αποδειχθεί ότι τα φυτά της νεροφακής μπορούν να αφομοιώσουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων, φωσφόρου και αζώτου. Ακόμα και τα ριζίδια της νεροφακής είναι ξενιστές βακτηρίων, τα οποία συμβάλλουν περαιτέρω στην απορρόφηση των παραπάνω συστατικών (Nieuwenhuis & Maring, 2009). Ωστόσο, αν το νερό στο οποίο αναπτύσσεται η νεροφακή είναι πολύ πλούσιο στα ανωτέρω συστατικά, τότε θα πρέπει η παραγόμενη νεροφακή να μην χρησιμοποιηθεί για ανθρώπινη κατανάλωση ή ως ζωοτροφή.

Ανάλογα με το επίπεδο μόλυνσης των νερών στα οποία καλλιεργείται η νεροφακή διαμορφώνεται και η καταλληλότητά της για την εκάστοτε χρήση. Σε νερά μη μολυσμένα, δηλαδή με πολύ μικρή συγκέντρωση σε θρεπτικά συστατικά, η παραγόμενη νεροφακή μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί για τη διατροφή του ανθρώπου αλλά και τη σίτιση ζώων, και να αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τη σόγια ως πηγή πρωτεΐνης (Van der Spiegel κ.ά., 2013).

Η νεροφακή που προέρχεται από μετρίως μολυσμένα νερά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα για διάφορες καλλιέργειες. Το επίπεδο του περιεχόμενου αζώτου είναι αυτό που έχει κύρια σημασία για το αν επαρκεί η νεροφακή για τη λίπανση ή αν πρέπει να εφαρμοσθεί επιπλέον ποσότητα χημικού λιπάσματος. Αξιοποιήσιμο είναι επίσης και το ίδιο το νερό που αναπτύχθηκε η νεροφακή, μιας και μπορεί να γίνει και άρδευση των καλλιεργειών με αυτό. Τα είδη της νεροφακής που έχουν χρησιμοποιηθεί προς αυτή την κατεύθυνση μέχρι στιγμής είναι το *Lemna aoukikusa* και το *Lemna minor*, σε έναν τομέα που χρήζει περισσότερης έρευνας (Suzuki κ.ά., 2014). Ως λίπασμα, η νεροφακή μπορεί να εφαρμοστεί είτε νωπή είτε αποξηραμένη. Η Tamra Fakhorian (2015) προτείνει τη νωπή μορφή, λόγω ευκολίας της όλης διαδικασίας αλλά και χαμηλότερου κόστους. Άλλη μία εφαρμογή της νεροφακής που παράγεται σε μετρίως μολυσμένα νερά είναι η χρήση της ως εδαφοβελτιωτικό. Η φυτική μάζα της νεροφακής, αφού υποστεί τις κατάλληλες

φυσικοχημικές διεργασίες, μπορεί να προστεθεί ως κομπόστ στο έδαφος και να συμβάλλει έτσι στη βελτίωση της δομής του (Kostecka & Kaniuczac, 2008).

Όταν η νεροφακή έχει παραχθεί σε πολύ μολυσμένα νερά, με πολύ μεγάλη συγκέντρωση σε θρεπτικά συστατικά και βαρέα μέταλλα, η είσοδος αυτών των ουσιών στην τροφική αλυσίδα πρέπει να αποφευχθεί, οπότε πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της ως τροφή για τον άνθρωπο ή τα ζώα. Τότε όμως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας (Verma & Sunthar, 2015).

Τέλος, μία επιπλέον μέθοδος αξιοποίησης της φυτικής βιομάζας της νεροφακής που είναι χημικά επιβαρυνμένη και δεν ενδείκνυται για άλλες χρήσεις, είναι η παραγωγή βιοπλαστικών. Στην περίπτωση αυτή, το άμυλο και οι πρωτεΐνες των φυτών μετατρέπονται σε πολυμερή μέσω χημικών διεργασιών (Zeller κ.ά., 2013).

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε ίνες και η υψηλή διατροφική αξία της νεροφακής την καθιστούν ποιοτική ζωοτροφή ή συστατικό της ζωοτροφής για τα ζώα και ενδεχομένως συστατικό διατροφής του ανθρώπου. Χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και άζωτο, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα στην καλλιέργεια μέσω της απευθείας εφαρμογής στο έδαφος ή μέσω κομποστοποίησης. Η εφαρμογή βιοκτόνων, για τον περιορισμό των προσβολών της νεροφακής από έντομα και μύκητες, είναι αποφασιστικής σημασίας εξαιτίας της ευαισθησίας της νεροφακής σε αυτές και την πιθανή μεταφορά τους στην τροφική αλυσίδα. Ως προς αυτό, βέβαια, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα φυτοφάρμακα που θα χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, έχουν σχεδιαστεί για τη γεωργία, και ενδεχομένως να συμπεριφέρονται διαφορετικά στα υδατικά συστήματα που αναπτύσσεται η νεροφακή (Iqbal, 2012).

1.4.2. Χρήση ως τροφή για τον άνθρωπο και τα ζώα

Τα φυτά νεροφακής καλλιεργούνται εύκολα, γρήγορα και μπορούν να παράγουν βιομάζα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (εφόσον και η συγκομιδή γίνεται τακτικά) ενώ ταυτόχρονα παρέχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού και εκμετάλλευσης άγονης γης (Markou κ.ά., 2018), και έτσι, δεν γίνεται κατάληψη γόνιμης, καλλιεργήσιμης γης. Επιπλέον, δεν είναι υποχρεωτική η εφαρμογή λιπασμάτων, καθώς προσλαμβάνουν θρεπτικά στοιχεία από το νερό (De Beukelaar, 2017). Επίσης, δεν πρόκειται για γενετικά τροποποιημένο οργανισμό και δεν περιέχει γλουτένη (Sonta κ.ά., 2019). Λόγω έλλειψης εξειδικευμένων δομών, τα φύλλα-φυτά της νεροφακής εμφανίζουν λίγες ίνες συγκριτικά με τα περισσότερα φυτά και αυτό συνηγορεί στο να είναι όλοι οι ιστοί της μεταβολικά ενεργοί και να

έχουν υψηλή διατροφική αξία (Skillicorn κ.ά., 1993). Σε σύγκριση με τα περισσότερα καλλιεργούμενα σε έδαφος φυτά, όλη η φυτική του μάζα, όπως αναφέρθηκε, είναι μεταβολικά ενεργή, δηλαδή δεν έχει μη αξιοποιήσιμη βιομάζα, όπως έχει η σόγια, το ρύζι και ο αραβόσιτος. Συνεπώς, ολόκληρο το φυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες χρήσεις. Εν αντιθέσει, στα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτά όπως το ρύζι, η σόγια και ο αραβόσιτος, αφαιρείται σημαντική ποσότητα βιομάζας μετά τη συγκομιδή (Skillicorn κ.ά., 1993).

Σε πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία απόνερα, οι πληθυσμοί νεροφακής μπορούν να παράγουν έως και 55 τόνους ξηρής μάζας ανά εκτάριο ετησίως, περισσότερο δηλαδή κατά πέντε φορές από την ξηρή μάζα που παράγει το καλαμπόκι, το οποίο θεωρείται ταχέως αναπτυσσόμενο φυτό μεγάλης οικονομικής σημασίας (Kutschera & Briggs, 2013), ενώ ανά εκτάριο γης παράγει 4-5 φορές περισσότερη πρωτεΐνη σε σχέση με τη σόγια (Soñta κ.ά., 2019).

1.4.2.1. Νεροφακή για ανθρώπινη κατανάλωση

Στην Μιανμάρ, το Λάος και τη Βόρεια Ταϊλάνδη, καταναλώνεται παραδοσιακά το φυτικό είδος *Wolffia arrhizal* (Bhanthumnavin & McCarry, 1971) όπου συναντάται ως λαχανικό με το όνομα «khai-nam», που μεταφράζεται ως «αυγά του νερού» (Arpenroth κ.ά., 2018; Van der Spiegel κ.ά., 2013). Η νεροφακή που καλλιεργείται σε αυτές τις περιοχές διακινείται στις τοπικές αγορές. Βέβαια, το ενδιαφέρον για το προϊόν αυτό είναι μειούμενο καθώς θεωρείται «το φαγητό των φτωχών». Η χρήση των ειδών της οικογένειας *Lemnaceae* για ανθρώπινη κατανάλωση δεν έχει, περιέργως, επεκταθεί και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Μια πιθανή εξήγηση ίσως είναι η μεγάλη περιεκτικότητα της νεροφακής σε κρυσταλλοποιημένο οξαλικό οξύ που έχει αρνητική επίδραση στη γεύση. Ένας ακόμα παράγοντας που συμβάλλει στην έλλειψη ενδιαφέροντος για την κατανάλωση της νεροφακής από τον άνθρωπο, συνιστά το γεγονός ότι είναι δύσκολο να διαχωριστούν από το φυτό οι διάφοροι οργανισμοί αλλά και παθογόνοι μικροοργανισμοί που αυτή φέρει, όπως τα σκουλήκια, τα σαλιγκάρια, τα πρωτόζωα και τα βακτήρια (Gijzen & Khondker, 1997).

1.4.2.2. Άμεσοι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία

Ανασταλτικό παράγοντα ωστόσο για τη χρήση των φυτών νεροφακής στη διατροφή αποτελεί η τάση τους να απορροφούν και να συσσωρεύουν εκτός από πληθώρα θρεπτικών συστατικών, επίσης οργανικά ή/και ανόργανα προϊόντα που δύνανται να μολύνουν τη βιομάζα (Markou κ.ά., 2018), όπως βαρέα μέταλλα και άλλες τοξικές

ουσίες, όταν το νερό στο οποίο αναπτύσσονται είναι μολυσμένο με αυτά. Οι τοξικοί αυτοί για τους έμβιους οργανισμούς παράγοντες εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα με πολλούς τρόπους και πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή όταν η νεροφακή χρησιμοποιείται ως τροφή (Van der Spiegel κ.ά., 2013). Τα βαρέα μέταλλα μπορεί να είναι το κάδμιο, το σελήνιο, ο χαλκός, το χρώμιο, το νικέλιο, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, το κοβάλτιο, ο σίδηρος, το αρσενικό, το ουράνιο, το μαγνήσιο, το αργίλιο, ο χρυσός, το στρόντιο και άλλα. Αυτά μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ανάπτυξη της νεροφακής αλλά και να βλάψουν την υγεία ζώων και ανθρώπων, μιας και περνούν στην τροφική αλυσίδα. Εκτός από τα βαρέα μέταλλα, άλλα τοξικά μόρια που έχει δειχθεί ότι προσλαμβάνονται από φυτά νεροφακής είναι οι φαινόλες και τα εντομοκτόνα, λιπόφιλα μόρια, οξέα, άλατα, παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως τα βακτήρια *Escherichia coli*, *Clostridium botulinum*, μύκητες, πρωτόζωα καθώς και ασπόνδυλα (Iqbal, 2012). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μόλυνση καραβίδων με κάδμιο, αφού τράφηκαν με φυτά νεροφακής που το είχαν συσσωρεύσει (Wigginton, 2005). Εκτός από την ικανότητα πρόσληψης βλαβερών για την υγεία του ανθρώπου ουσιών, κάποια είδη νεροφακής έχει αποδειχθεί, ότι παράγουν δευτερογενείς μεταβολίτες, οι οποίοι σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να είναι τοξικοί για έμβιους οργανισμούς που τους καταναλώνουν. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το οξαλικό οξύ (Van der Spiegel κ.ά., 2013).

Για τη μείωση της πιθανότητας της μεταφοράς παθογόνων από τα ζώα που αναθρέφονται με νεροφακή που αναπτύσσεται σε λύματα, στους καταναλωτές, προτείνεται η αφαίρεση των οργάνων του πεπτικού, η επαναλαμβανόμενη πλύση με πόσιμο νερό και προσεκτικό μαγείρεμα. Η χρήση νερού, που προέρχεται από λίμνες παραγωγής νεροφακής που έχουν λιπανθεί με περιττώματα και απόβλητα, για λουτρό και πλύσιμο ρούχων θα πρέπει να απαγορεύεται (Iqbal, 2012). Εντούτοις, οι έλμινθες, τα βακτήρια, οι ιοί και τα πρωτόζωα συνιστούν παθογόνους μικροοργανισμούς ενδιαφέροντος. Δεν υπάρχει διαθέσιμη σχεδόν καθόλου βιβλιογραφία σχετικά με την μεταφορά των παθογόνων μικροοργανισμών από τις μονάδες καλλιέργειας νεροφακής (Gijzen & Khondker, 1997). Οι λίγες μελέτες που έχουν γίνει μέχρι στιγμής δεν έχουν φέρει στην επιφάνεια σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο. Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητη και εν εξελίξει, η περαιτέρω έρευνα. Ένας πιθανός κίνδυνος για την υγεία λόγω της μεταφοράς οργανικών και ανόργανων τοξινών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη καθώς η συσσώρευση αυτών των στοιχείων είναι υψηλή στην ζωοτροφή νεροφακής. Οι

Krishnan & Smith (1987) αναφέρουν αποδεκτά επίπεδα βαρέων μετάλλων και φυτοφαρμάκων σε ψάρια που μεγαλώνουν σε λίμνες σταθεροποίησης λυμάτων. Παρόλα αυτά, ένας πιθανός κίνδυνος για την υγεία λόγω της βιοσυσσώρευσης των τοξινών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ακόμα και αν μερικά ζώα όπως τα ψάρια διαθέτουν εξειδικευμένες πρωτεΐνες που δεσμεύουν και περιορίζουν ορισμένα βαρέα μέταλλα ή μεταβολίζουν τις τοξίνες.

Εν κατακλείδι, η νεροφακή θεωρείται πολλά υποσχόμενη τροφή και για τη δύση, δεδομένης της θρεπτικής αξίας, της μεγάλης απόδοσης και της οικονομικής σημασίας με προαπαιτούμενο όμως να υπάρχει επιτήρηση των καλλιεργειών που προορίζονται για διατροφικούς σκοπούς. Πρέπει, δηλαδή, να αναπτυχθούν στρατηγικές για τη μείωση της συγκέντρωσης βλαβερών προϊόντων, είτε με προκατεργασία των καλλιεργητικών μέσων και των βιοτόπων είτε ελέγχοντας τις συνθήκες καλλιέργειας αποτρέποντας τη μόλυνση της βιομάζας (Markou κ.ά., 2018; Appenroth κ.ά., 2018). Η χρήση φυσικών πηγών και οικιακών ή ζωικών αποβλήτων δε φαίνεται να ενέχει ρίσκο καθώς περιέχουν απειροελάχιστες ποσότητες βαρέων μετάλλων και ως εκ τούτου οι περισσότερες μελέτες συνηγορούν στο ότι η νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διατροφή του ανθρώπου (Sonta κ.ά., 2019).

1.4.2.3. Έμμεσοι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, τα βαρέα μέταλλα και οι οργανικές ή/και ανόργανες τοξίνες είναι τα κύρια θέματα ανησυχίας για τη δημόσια υγεία. Οι σχετιζόμενοι κίνδυνοι επηρεάζουν τρεις κύριες κατηγορίες ανθρώπων. Αρχικά, τους εργάτες που είναι σε άμεση ή έμμεση επαφή με τα απόβλητα κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση ενός συστήματος επεξεργασίας νεροφακής, και κατά τον χειρισμό και επεξεργασία των παραγόμενων προϊόντων του συστήματος, όπως τα ίδια τα φυτά της νεροφακής, ψάρια και λάσπη. Τρίτον, επηρεάζεται ο πληθυσμός, και ειδικότερα τα παιδιά, που διαβιεί σε περιοχές που γειτνιάζουν με τις λίμνες επεξεργασίας. Πολλά άτομα ανήκουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, και σε πολλές περιπτώσεις και στις τρεις κατηγορίες και ως εκ τούτου διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο. Ιδιαίτερα οι εργαζόμενοι, αλλά επίσης και ο πληθυσμός που μένει κοντά στις μονάδες επεξεργασίας νεροφακής, θα πρέπει να παροτρύνονται να υιοθετούν μέτρα υψηλής προσωπικής υγιεινής (Iqbal, 2012).

1.4.3. Χρήση ως ζωοτροφή

Η νεροφακή έχει αποτελέσει συμπλήρωμα διατροφής στη ζωική παραγωγή, συγκεκριμένα σε ψάρια και σε οικόσιτα ζώα, όπως πουλερικά, πάπιες και χοίρους,

ενώ έχει χορηγηθεί και σε βοσκή μηρυκαστικών, παρέχοντας μια ισορροπία στη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών. Αντίστοιχες δίαιτες μπορούν να εφαρμοστούν και σε συστήματα παραγωγής βοοειδών, προβάτων και αιγών. Η πιο συχνή και πιο καλά μελετημένη χρήση της νεροφακής είναι η χρήση της ως τροφή για τα ψάρια. Ως ζωοτροφή για πάπιες, όρνιθες, γαρίδες του γλυκού νερού, χοίρους, εδώδιμα σαλιγκάρια, άλογα και μηρυκαστικά όπως τα βοοειδή και τα πρόβατα, οι πληροφορίες είναι περιορισμένες. Το πλεονέκτημα της νεροφακής έγκειται στην ικανότητα παροχής, στα εκάστοτε ζώα, αξιόλογων ποσοτήτων αμινοξέων, όπως λυσίνης, μεθειονίνης, λευκίνης, θρεονίνης, βαλίνης, ισολευκίνης καθώς και βιταμινών (Soñta κ.ά., 2019). Χαρακτηριστικό παράδειγμα άμεσης επίδρασης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων ζωικών προϊόντων είναι ότι οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις της νεροφακής στις χρωστικές ξανθοφύλλη και καροτένιο βαθαίνουν το χρώμα των κρόκων των αυγών κότας και το χρώμα του δέρματος της κόκκινης τιλάπιας (Tguax κ.ά., 1972).

1.4.3.1. Ψάρια

Οι υδατοκαλλιέργειες τα τελευταία χρόνια εξαπλώνονται όλο και περισσότερο, κι αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τις αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικά σε Αφρική και Ασία, όπου εκατομμύρια άνθρωποι, υποφέρουν από έλλειψη τροφής (FAO, 2014). Η διατροφή των ψαριών σε μια υδατοκαλλιέργεια επιβαρύνει σημαντικά τον οικονομικό κύκλο μιας εκμετάλλευσης, συνήθως από 50% ως 70-80% (NRC, 2011; Luo κ.ά., 2004). Το γεγονός αυτό έχει επιτείνει την ανάγκη εξεύρεσης νέων, εναλλακτικών προϊόντων διατροφής, που θα μειώσουν το κόστος σίτισης χωρίς όμως να υποβαθμιστεί ποιοτικά η διατροφική αξία των παραγόμενων ψαριών. Το πιο σημαντικό συστατικό διατροφής για τα ψάρια, είναι η πρωτεΐνη, και η πιο συνηθισμένη πηγή της είναι η σόγια που είναι ένα κατεξοχήν πρωτεϊνούχο φυτό. Ωστόσο, το υψηλό κόστος προμήθειάς της καθιστά πολλές φορές δύσκολη την εξασφάλισή της.

Η χρήση της νεροφακής ως τροφή για τα ψάρια είναι κατά μακράν η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της. Η νεροφακή μπορεί να χορηγηθεί φρέσκια ως η αμιγής ζωοτροφή, ή σε συνδυασμό με άλλη ζωοτροφή, σε καλλιέργειες Κινέζικων και Ινδικών κυπρίνων και τιλάπιας. Ειδικότερα, τα φυτοφάγα και παμφάγα ψάρια όπως ο χορτοφάγος κυπρίνος (*Ctenopharyngodon idella*), η ασημένια μπριάνα (silver barb, *Puntius gonionotus*) και η τιλάπια (*Oreochromis sp.*) τρέφονται ευρέως με νεροφακή.

Η υψηλή διατροφική αξία της βιομάζας που προκύπτει από τα φυτά της νεροφακής, σε συνδυασμό με τη σχετική ευκολία και το μικρό κόστος παραγωγής της, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών ως προς την αξιοποίησή της ως τροφή για ιχθυοκαλλιέργειες (Shireman κ.ά., 1977, 1978; Hillman & Culley, 1978; Stephensen κ.ά., 1980; Gaigher κ.ά., 1984; Naskar κ.ά., 1986; Hassan & Edwards, 1992). Η υπάρχουσα μέχρι στιγμής βιβλιογραφία καταδεικνύει την καταλληλότητα της φρέσκιας ή και της αποξηραμένης νεροφακής ως αμιγή τροφή ή σε συνδυασμό με άλλη τροφή για τα ψάρια, και μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω.

Οι Aslam & Zuberi (2017), χορήγησαν σε κυπρίνο (grass carp, *Ctenopharyngodon idella*) και ασημένιο κυπρίνο (silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*) δύο διαφορετικά σιτηρέσια. Ένα που περιελάμβανε 20% κατά βάρος νεροφακή, και ένα που στο ίδιο ποσοστό περιείχε σόγια. Παρατήρησαν ότι με τη σίτιση με νεροφακή επετεύχθησαν καλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης αυξητικής ορμόνης στα ψάρια και καλύτεροι δείκτες παραγωγής σε σχέση με τη σόγια και μικρότερο κόστος. Οι Ibrahim κ.ά. (2017), σε καλλιέργεια τιλάπιας του Νείλου (*Oreochromis niloticus*) εφάρμοσαν πέντε επίπεδα διατροφής ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της νεροφακής (0%, 25%, 50%, 75%, 100%). Παρατήρησαν ότι, αυξανόμενου του ποσοστού της νεροφακής στο σιτηρέσιο, η εκμετάλλευση γινόταν όλο και πιο επικερδής. Ωστόσο, μόνο στο επίπεδο του 25% δεν επηρεάστηκε η διατροφική αξία και οι ποιοτικοί δείκτες παραγωγής, για αυτό και συστήνουν ως αποδοτικότερο παραγωγικά και οικονομικά αυτό το ποσοστό συμμετοχής της νεροφακής στο σιτηρέσιο των ψαριών.

Επιτυχημένες προσπάθειες θρέψης κυπρίνων (grass carp) με νεροφακή έχουν καταγραφεί από τη δεκαετία του 1960 (Galkina κ.ά., 1965; Nikolskij & Verigin, 1966; Fisher, 1968, 1970; Edwards, 1974; Porath & Koton, 1977; Shireman κ.ά., 1977, 1978; Baur & Buck, 1980; Haijra & Tripathi, 1985). Οι Galkina κ.ά. (1965) κατέγραψαν πιο γρήγορη ανάπτυξη των κυπρίνων (grass carp) όταν τρέφονταν αμιγώς με νεροφακή σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη τροφή. Οι Porath & Koton (1977) αναφέρουν τριπλασιασμό του βάρους των κυπρίνων (από τα 100 g στα 300 g) μέσα σε 50 ημέρες. Χρήση της νεροφακής έχει γίνει και για τη διατροφή άλλων ψαριών, όπως ο κοινός κυπρίνος (common carp), τα λυκόψαρα (catfish), τον Ινδικό μεγάλο κυπρίνο (Indian major carp) και την τιλάπια. Τα αποτελέσματα ποικίλουν ανάλογα με το είδος του ψαριού. Ο κυπρίνος (grass carp) φαίνεται να αντιδρά πιο

θετικά όταν η νεροφακή του χορηγείται ως αμιγής τροφή παρά ως ένα ποσοστό της συνολικής τροφής. Οι Fasakin κ.ά., (1999) πειραματίστηκαν με τιλάπια του Νείλου και δεν παρατήρησαν καμία διαφορά στην ανάπτυξη των ψαριών όταν το ποσοστό της συνολικής τροφής σε νεροφακή ήταν μέχρι 30%, ενώ για μεγαλύτερο ποσοστό η φυσιολογική ανάπτυξη επηρεάστηκε αρνητικά. Τα περισσότερα είδη φυτοφάγων ψαριών προτιμούν περισσότερο τη νεροφακή για τη διατροφή τους σε σχέση με άλλα είδη υδρόβιων φυτών. Ωστόσο, μερικοί ερευνητές διαφωνούν και υποστηρίζουν ότι φυτά των γενών *Hydrilla* και *Najas* προτιμούνται περισσότερο από τα ψάρια από ότι η νεροφακή (Opuszynsky, 1972; Duthu & Kilgen, 1975; Rifai, 1979; Cassani, 1981; Cassani & Caton, 1983). Πληροφορίες και δεδομένα σχετικά με το ποιο συγκεκριμένο είδος νεροφακής προτιμούν περισσότερο τα ψάρια σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη, δεν υπάρχουν.

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα, καταδεικνύεται ότι η νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονοκαλλιέργεια ασημένιου κυπρίνου (*silver carp*, *Hypophthalmichthys molitrix*) και να χορηγηθεί με τη μορφή σκόνης μετά από αποξήρανση, μειώνοντας σημαντικά το κόστος (Hassan κ.ά., 2019). Επιπλέον, η *Lemna minor* έχει χρησιμοποιηθεί εκτός από μονοκαλλιέργεια και σε πολυκαλλιέργεια υδρόβιων οργανισμών με θετικά αποτελέσματα (Talukdar & Rahman, 2012). Χρήση φρέσκιας *Lemna gibba* ανεπτυγμένης σε απόβλητα, επίσης έδειξε ότι η νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα στη διατροφή της τιλάπιας (*Oreochromis niloticus*) (El-Shafai κ.ά., 2004). Σε άλλη πειραματική προσέγγιση στη διατροφή της τιλάπιας του Νείλου (*Nile tilapia*) προστέθηκε αποξηραμένη καθώς και φρέσκια νεροφακή σε διάφορες αναλογίες και παρατηρήθηκε ότι τα ψάρια που η διατροφή τους ήταν βασισμένη στη νεροφακή (*Lemna minor*) είχαν υψηλότερα επίπεδα φωσφόρου και πρωτεϊνών και χαμηλότερη σύσταση σε λιπαρά, σε σχέση με τα δείγματα ελέγχου (στα οποία δεν χορηγήθηκε καθόλου νεροφακή), τα οποία συσσωρεύσαν περισσότερο ξηρό βάρος (El-Shafai κ.ά., 2004), ενώ σε άλλες προσεγγίσεις στο ίδιο είδος ψαριών η χρήση νεροφακής στην τροφή δεν παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με την εμπορική τροφή (Tavares κ.ά., 2008). Ωστόσο, μετά από χορήγηση αποξηραμένης *Lemna pauciscostata* στη διατροφή *Heterobranchus longifilis*, παρότι επήλθε μείωση στο ολικό βάρος, στο δείκτη αξιοποίησης της τροφής και την ποσοστιαία επιβίωση, οι ερευνητές συνέστησαν τη χρήση της νεροφακής λόγω του πολύ χαμηλού της κόστους σε σχέση με την εμπορική τροφή (Sanni & Fakunle, 2009). Φυτά γένους *Lemna* έχουν

χρησιμοποιηθεί και μετά από ζύμωση ως συμπλήρωμα τροφής για γαρίδες (*Litopenaeus vannamei*) παρέχοντας πολύ ικανοποιητική ανάπτυξη (Flores Miranda κ.ά., 2014).

1.4.3.2. Πτηνά

Αντίστοιχα με τις ιχθυοκαλλιέργειες, στην κρεοπαραγωγό ορνιθοτροφία τα έξοδα σίτισης των πτηνών προσεγγίζουν το 70% του συνολικού κόστους, με το 15% να αντιστοιχεί στα έξοδα για τον εμπλουτισμό της με πρωτεϊνούχες τροφές. Σε αυτό το πλαίσιο, έχει μελετηθεί η προσθήκη νεροφακής ως υποκατάστατο των πρωτεϊνούχων πηγών που χρησιμοποιούνται στο σιτηρέσιο των ορνίθων και έχει βρεθεί ότι η συνεισφορά της, από άποψη πρωτεΐνης, στο σιτηρέσιο, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 6%, ωστόσο περαιτέρω μελέτη επικεντρωμένη σε διαφορετικά είδη είναι απαραίτητη (Mwale & Francisca, 2013).

Οι Dang κ.ά. (2012) αναφέρουν ότι η εξ ολοκλήρου αντικατάσταση των σιτηρεσίων σόγιας με αντίστοιχα νεροφακής μειώνει την ανάπτυξη των πτηνών και την περιεκτικότητα του κρέατός τους σε πρωτεΐνη, ωστόσο το πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής της νεροφακής σε σχέση με το υψηλό απαιτούμενο κόστος της σόγιας, καθιστά το σύνολο της εκμετάλλευσης πιο κερδοφόρα και αντισταθμίζει τις απώλειες σε παραγωγή.

1.4.3.3. Χοίροι

Στην εκτροφή χοίρων, η χρήση αποξηραμένης νεροφακής ως συμπλήρωμα διατροφής, αντικαθιστώντας σε συγκεκριμένα ποσοστά τη σόγια, το μίσχο γλυκοπατάτας, ή το πίτυρο ρυζιού είχε είτε θετικά αποτελέσματα στην παραγωγή, είτε δεν την επηρέασε, καταδεικνύοντας ότι η νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως πρωτεϊνική πηγή χαμηλότερου κόστους στη συγκεκριμένη εκτροφή (Soñta κ.ά., 2019).

1.4.4. Άλλοι περιορισμοί αξιοποίησης της νεροφακής

Παρόλα αυτά, οι παρακάτω παράγοντες περιορίζουν την χρήση της νεροφακής που αναπτύσσεται σε λύματα για σκοπούς σίτισης και λίπανσης (Gijzen & Khondker, 1997):

- Η νεροφακή θα πρέπει να καλλιεργείται σε λύματα με εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και άλλων τοξικών στοιχείων, λόγω της υψηλής απορρόφησής τους.

- Η υψηλή υγρασία της νεροφακής (περίπου 95%) αυξάνει τα κόστη επεξεργασίας, μεταφοράς και αποξήρανσής της. Αυτή η συνθήκη είναι λιγότερο σημαντική στα ενοποιημένα συστήματα όπου η φρέσκια νεροφακή χρησιμοποιείται απευθείας.
- Τα γένη *Lemna* και *Spirodela* είναι πιθανό να περιέχουν υψηλά ποσοστά οξαλικού ασβεστίου γεγονός το οποίο περιορίζει την χρήση ορισμένων ειδών για κατανάλωση από τα μηρυκαστικά και τον άνθρωπο.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι επί του παρόντος, η χρήση της φρέσκιας νεροφακής περιορίζεται σε περιοχές κοντά στην εκμετάλλευση, εξαιτίας των περιορισμών στην συντήρηση, την αποθήκευση και την μεταφορά της νεροφακής. Ανάλογα με το είδος του ζώου για το οποίο προορίζεται, η φρέσκια νεροφακή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αμιγής ζωτροφή ή σε συνδυασμό με άλλες ζωτροφές. Σχεδόν όλα τα ζώα που αναφέρονται στα κεφάλαια που ακολουθούν τρέφονται με φρέσκια νεροφακή, με εξαίρεση τα πουλερικά, κυρίως τα κοτόπουλα, τα οποία σιτίζονται με αποξηραμένη νεροφακή. Η φρέσκια νεροφακή δύναται να αποθηκευτεί προσωρινά σε δροσερό και υγρό μέρος όπως για παράδειγμα σε μια δεξαμενή ή σε μια μικρή λίμνη. Το φρέσκο υλικό, το οποίο ξεκινά να ζυμώνεται λίγες ώρες μετά, σε υψηλή θερμοκρασία, δύναται να διατηρηθεί για αρκετές μέρες εφόσον διατηρείται δροσερό και νωπό (Skillicorn κ.ά., 1993). Η αποξήρανση στον ήλιο σε μικρή κλίμακα είναι δυνατή με το άπλωμα του φρέσκου υλικού στο έδαφος. Παρόλα αυτά, η ακτινοβολία UV αποδομεί τις πολύτιμες χρωστικές της νεροφακής. Η ανάπτυξη εφικτών υποδομών και τεχνολογιών για ηλιοαποξήρανση μεσαίας και μεγάλης κλίμακας καθώς και η πελετοποίηση (pelleting), φαίνεται να καθυστερούν προς το παρόν. Σύμφωνα με κάποιες κριτικές, η αποξήρανση της νεροφακής, ως συστατικό ξηρής κοκκώδους (pelleted) ζωτροφής, δεν είναι οικονομικά πραγματοποιήσιμη. Εντούτοις, η χρήση της σε ενυδατωμένη κοκκώδη (pelleted) ζωτροφή θα πρέπει να μελετηθεί (Edwards κ.ά., 1987). Η αποξήρανση της νεροφακής, της οποίας η περιεκτικότητα σε υγρασία ανέρχεται σε 92-94%, με κατανάλωση ενέργειας όπως το υγραέριο, το πετρέλαιο, ηλεκτρισμό ή βιομάζα, δεν είναι οικονομικά εφικτή καθώς απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας. Η οικονομική δυναμική του φυτού μπορεί δύναται να επιτευχθεί όταν το φρέσκο προϊόν μπορέσει να μετατραπεί με οικονομικό τρόπο σε ένα συμπυκνωμένο, αποξηραμένο προϊόν (Skillicorn κ.ά., 1993). Αυτό προϋποθέτει την ηλιοαποξήρανση και έπειτα είτε την κοκκοποίηση (pelleting), είτε την κονιορτοποίηση, είτε κάποια άλλη μέθοδο συντήρησης, όπως η ενσίρωση.

Αξίζει να τονιστεί, ότι η χρήση της νεροφακής, περιπλέκει σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση της ιχθυοκαλλιέργειας, και απαιτεί εμπειρία και δεξιότητες ώστε να καταστεί επιτυχής. Πρέπει να τηρείται μια ισορροπία ως προς την πυκνότητα των ψαριών, την τροφή τους και την εφαρμογή λιπάνσεων, ενώ παράλληλα επιβάλλεται η διατήρηση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου σε τέτοια επίπεδα ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγικότητα της εκμετάλλευσης. Επίσης, η ποιότητα και η διαθεσιμότητα της νεροφακής πρέπει να συμβαδίζει με την ανάπτυξη των ψαριών.

Επιπρόσθετα, αν και μία βιώσιμη ιχθυοκαλλιέργεια με μόνη πηγή διατροφής των ψαριών τη νεροφακή είναι εφικτό να υλοποιηθεί, υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που δείχνουν ότι με αυτό τον τρόπο τα παραγόμενα ψάρια εμφανίζουν μειωμένη περιεκτικότητα σε λιπαρά και υδατάνθρακες. Οι Gijzen & Ikramullah (1999) συστήνουν, για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, να χορηγείται στα ψάρια τροφή που να είναι μίγμα νεροφακής (50-60% σε ξηρό βάρος) και άλλων τροφών (40-50% σε ξηρό βάρος) πλούσιων σε λιπαρά και υδατάνθρακες. Πράγματι, οι Hassan & Edwards (1992) αναφέρουν μειωμένη περιεκτικότητα στα παραπάνω συστατικά σε καλλιέργειες τιλάπιας, όταν τα ψάρια διατρέφονταν αποκλειστικά με νεροφακή, και για αυτό προτείνουν την παράλληλη χορήγηση πιτύρου ρυζιού (rice bran), ώστε τα ψάρια να μην μεταβολίσουν τις λιπαρές ουσίες για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Οι Gijzen & Khondker (1997) υποστηρίζουν ότι μία ετήσια παραγωγή 20 τόνων ξηρής νεροφακής/εκτάριο μπορεί να υποστηρίξει την παραγωγή 8 τόνων ψαριών/εκτάριο, η οποία είναι συγκριτικά μεγαλύτερη σε σχέση με τη συνήθη παραγωγή μια μέσης ημιεντατικής καλλιέργειας κυπρίνων (grass carp).

Η ταυτόχρονη συνύπαρξη νεροφακής και ιχθυοκαλλιέργειας στον ίδιο χώρο, αν και φαίνεται ενδιαφέρουσα, ειδικά όταν ο χώρος αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες στην εφαρμογή της. Η κάλυψη της επιφάνειας του νερού με τη νεροφακή μειώνει την ικανότητα διάλυσης και ενσωμάτωσης οξυγόνου στο νερό, οπότε θα πρέπει τα είδη των ψαριών που θα αναπτυχθούν να εμφανίζουν αντοχή στην έλλειψη οξυγόνου (Gijzen & Khondker, 1997). Επίσης, η πιθανότητα μεταφοράς και ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών αυξάνονται όταν νεροφακή και ψάρια αναπτύσσονται ταυτόχρονα.

1.4.5. Άλλες εφαρμογές της νεροφακής

1.4.5.1. Φυτοοξυγίαυση μολυσμένων νερών και αποβλήτων

Τεράστιες ποσότητες υδατικών αποβλήτων με διάφορα οργανικά και ανόργανα υπολείμματα απορρίπτονται ετησίως σε λίμνες, ποτάμια και ωκεανούς, μειώνοντας

κάθε φορά κατά 40% την πρωτογενή βιολογική δραστηριότητα και παραγωγικότητα αυτών των οικοσυστημάτων (Gupta & Prakash, 2013). Αυτές οι απορρίψεις επηρεάζουν άμεσα και την υγεία του ανθρώπου. Προς αυτή την κατεύθυνση συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό και η γεωργία, η οποία μέσω της αυξημένης χρήσης φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων και άλλων αγροχημικών, επιτείνει τη μόλυνση των υδάτων. Επιπρόσθετα, τα πλούσια, σε θρεπτικά συστατικά, λύματα που απορρίπτονται σε υδάτινα περιβάλλοντα προκαλούν ευτροφισμό (εξάντληση οξυγόνου) και τα καθιστούν ακατάλληλα για οποιαδήποτε χρήση και αξιοποίησή τους. Οι τεχνολογίες απορρύπανσης των υδάτινων αποβλήτων τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί, ωστόσο το υψηλό ακόμα κόστος περιορίζει την ευρεία εφαρμογή τους (Charman, 1992). Για το λόγο αυτό γίνονται εντατικές προσπάθειες εξυγίανσης των υδάτων μέσω βιολογικών διαδικασιών όπως η χρήση κατάλληλων φυτικών ή ζωικών οργανισμών οι οποίοι χρησιμοποιούν τις μολυσματικές ουσίες που περιέχονται στα νερά ως πρώτη ύλη για την ανάπτυξή τους. Ένα τέτοιο είδος φυτού αποτελεί η νεροφακή (Chara κ.ά., 1999). Η βιοαποκατάσταση των αποβλήτων αποτελεί, επομένως, οικονομικά προσιτή, «πράσινη» τεχνολογία που εκμεταλλεύεται ειδικά φυτά ικανά να απορροφούν διάφορες ουσίες, αφαιρώντας ανεπιθύμητα στοιχεία από το νερό (Forni & Tommasi, 2015). Η ικανότητα της νεροφακής να κατακρατά πλήθος στοιχείων, «καθαρίζοντας» έτσι το νερό, έχει κάνει ευρεία τη χρήση της για το σκοπό αυτό, αν και η ικανότητα βιοαποκατάστασης εξαρτάται από το είδος της μόλυνσης και τις συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στο νερό καθώς και από το είδος της νεροφακής (Forni & Tommasi, 2015).

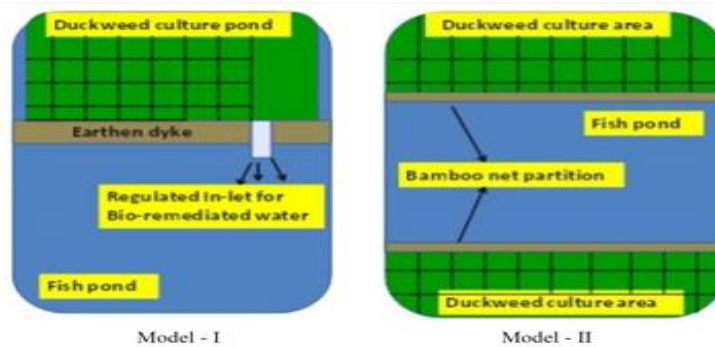
Τα φυτά νεροφακής έχουν την ικανότητα να απορροφούν νιτρικά και φωσφορικά ιόντα, ασβέστιο, νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο, άνθρακα και χλώριο. Με τη συγκομιδή των φυτών, επέρχεται η οριστική απομάκρυνση των στοιχείων αυτών από το σύστημα (Gupta & Prakash, 2013). Επίσης, μειώνουν τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια, το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) (Gupta & Prakash, 2013), καθώς και βαρέα μέταλλα, οργανικές ενώσεις, τοξίνες κυανοβακτηρίων και διαλυμένα άλατα (Daud κ.ά., 2018; Forni & Tommasi, 2015). Είδη νεροφακής είτε μόνα είτε σε συνδυασμό με άλλα φυτά χρησιμοποιούνται για βιοεξυγίανση πρωτογενών και δευτερογενών λυμάτων εδώ και δεκαετίες (Ekperusi κ.ά., 2019). Ποικίλα είδη νεροφακής έχουν χρησιμοποιηθεί προς καθαρισμό δημοτικών και βιομηχανικών λυμάτων σε διάφορες χώρες όπως το

Μπαγκλαντές, το Ισραήλ και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Özengin & Elmaci, 2007).

Οι Ferdoushi κ.ά. (2008) εξέτασαν την αποδοτικότητα φυτικών ειδών των γενών *Lemna* και *Azolla*, ως βιοφίλτρα, και παρατήρησαν ότι μέσω αυτών απομακρύνθηκαν μεγάλες ποσότητες αζώτου και φωσφόρου από τα νερά ιχθυοκαλλιέργειών. Ανάλογες παρατηρήσεις έκαναν και οι Leng κ.ά. (1995). Επίσης, πληθώρα ερευνών (Skillicorn κ.ά., 1993; Landolt & Kandeler, 1987) έχει επιβεβαιώσει την ικανότητα της νεροφακής να απορροφά μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων, οργανικών υπολειμμάτων και μικροστοιχείων από υγρά απόβλητα.

Οι δεξαμενές νερού, που κατασκευάζονται σε αγροτικές περιοχές για την κατακράτηση του βρόχινου νερού, συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών υλών, προκαλώντας έτσι το φαινόμενο του ευτροφισμού, επομένως ενδείκνυνται για βιοαποκατάσταση του υδάτινου μέρους τους, προκειμένου να ανακυκλωθούν αυτά τα χρήσιμα θρεπτικά στοιχεία που περιέχει σε άλλα αγροτικά συστήματα όπου είναι απαραίτητα (Ansal κ.ά., 2010). Η νεροφακή αποτελεί την κεντρική μονάδα της διαδικασίας ανακύκλωσης των αποβλήτων, που μιας και λειτουργεί με την ενέργεια προερχόμενη από τη φωτοσύνθεση, αποτελεί αποτελεσματικό, οικονομικό και οικολογικά φιλικό τρόπο βιοαποκατάστασης των μολυσμένων υδάτων. Πρακτικά, για βιοαποκατάσταση νερού που προορίζεται για ιχθυοκαλλιέργειες, η δεξαμενή χωρίζεται με χωμάτινες κατασκευές σε δύο μικρότερες, μία για ιχθυοκαλλιέργεια και μία δεύτερη που καλύπτεται από νεροφακή. Το επεξεργασμένο νερό από τη δεύτερη δεξαμενή περιοδικά απελευθερώνεται στην πρώτη. Εναλλακτικά, φυτά νεροφακής καλυμμένα από στύλους μπαμπού ή πλέγμα δικτύων καλλιεργούνται απευθείας στην περιφέρεια της δεξαμενής ιχθυοκαλλιέργειας (Gurta & Prakash, 2013; Ansal κ.ά., 2010) **(Εικόνα 11)**.

Σύμφωνα με αποτελέσματα ερευνών, το είδος *Lemna minor* έχει χρησιμοποιηθεί με στόχο την έκπλυση απορριμμάτων υγειονομικής ταφής που περιείχαν τόσο ανόργανα όσο και οργανικά απόβλητα, με αξιοσημείωτη επιτυχία. (Daud κ.ά., 2018).



Εικόνα 11. Μοντέλα βιοαποκατάστασης με χρήση φυτών νεροφακής (Ansal κ.ά., 2010).

1.4.5.2. Παραγωγή βιοκαυσίμου

Η φυτική μάζα της νεροφακής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή βιοαιθανόλης, βουτανόλης και βιοαερίου (Cui & Cheng, 2015). Τα ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι οι κύριες πηγές ενέργειας, των οποίων τα αποθέματα όμως δεν είναι απεριόριστα. Για το λόγο αυτό, μία τις εναλλακτικές πηγές που αναζητούνται για την εξασφάλιση ενέργειας και στο μέλλον είναι η βιοανανεώσιμη ενέργεια. Η νεροφακή μπορεί να αποτελέσει εναλλακτικό φυτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιοκαυσίμου, ειδικά αν καλλιεργηθεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες αυξάνουν τα επίπεδα αμύλου που περιέχουν τα παραγόμενα φυτά. Η μετατροπή οργανικών αποβλήτων, κυρίως ζωικής προέλευσης, μέσω αναερόβιας πέψης σε βιοαέριο έχει επίσης μελετηθεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Η φυτική βιομάζα της νεροφακής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προς αυτή την κατεύθυνση. Η προσθήκη βιομάζας νεροφακής σε αναερόβιους χωνευτές μαζί με απόβλητα ορνίθων ή χοίρων έχει αποδειχτεί ότι αυξάνει την ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου (Clark & Hillman, 1996; Huang κ.ά., 2013), ενώ αντίστοιχα πειράματα με απόβλητα αιγοπροβάτων και χρήση διαφορετικών συγκεντρώσεων σκόνης νεροφακής έδειξε ότι η προσθήκη 0,5-2% κατά βάρος νεροφακής στους χωνευτές αύξησε την ποσότητα του παραγόμενου μεθανίου και του ολικού βιοκαυσίμου (Triscari κ.ά., 2009). Η πυρόλυση της νεροφακής παράγει πρόδρομα μόρια βιοελαίων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως της λεγόμενης πράσινης βενζίνης και diesel, χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές (Muradov κ.ά., 2014).

1.4.5.3. Εντομοκτόνο

Πολλές έρευνες υποστηρίζουν τη χρησιμότητα της νεροφακής στην αντιμετώπιση κουνουπιών και άλλων εντόμων, καθώς ουσίες που περιέχονται σε αυτή φαίνεται να

έχουν εντομοκτόνο δράση, ειδικά στα προνυμφικά στάδια των κουνουπιών. Κάτι τέτοιο κάνει την καλλιέργεια νεροφακής πολύ σημαντική, ιδίως σε τροπικές περιοχές όπου ενδημούν λοιμώδεις νόσοι που μεταδίδονται μέσω εντόμων, όπως η ελονοσία, και όπου η ανθεκτικότητα των εντόμων απέναντι σε αντιπαρασιτικά φάρμακα ή εντομοκτόνα είναι μεγάλη. Χαρακτηριστικό, επίσης, είναι το γεγονός ότι τα κουνούπια γένους *Culex* ποτέ δεν αποικούν νερό που καλύπτεται από νεροφακή (Gupta & Prakash, 2013).

1.4.5.4. Αλγεοκτόνα

Τα χημικά που παράγονται από ορισμένα είδη νεροφακής όπως το *Lemna trisulca*, δρουν ανασταλτικά σε ορισμένα φύκη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αλγεοκτόνα. Τα φύκη αποτελούν συχνά μέσα διάδοσης του παθογόνου βακτηρίου της χολέρας και η εξάπλωσή τους παρατηρείται κυρίως σε ύδατα όπου υπάρχει ευτροφισμός. Συνεπώς, η καλλιέργεια νεροφακής σε τέτοια ύδατα, μειώνει την ποσότητα φωσφόρου παρουσιάζοντας αλγεοκτόνο δράση, έχοντας ως αποτέλεσμα και τη μείωση του παθογόνου αυτού βακτηρίου (Gupta & Prakash, 2013).

1.5. Σκοπός της μελέτης

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εκπόνηση οικονομοτεχνικής μελέτης σε μια υποτιθέμενη μονάδα τιλάπιας (*Oreochromis* sp.) παραγωγής 1000tn ετησίως, ώστε να εξετάσουμε την επίδραση που θα έχει στην υδατοκαλλιέργεια η αντικατάσταση του βιοφίλτρου από μονάδα καλλιέργειας νεροφακής με ταυτόχρονη αντικατάσταση του πρωτεϊνικού περιεχομένου της ιχθυοτροφής από τη νεροφακή. Πιο συγκεκριμένα, τα ερωτήματα προς διερεύνηση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα βασικά ερωτήματα και τα δευτερεύοντα.

Βασικά ερωτήματα

1. Ποια είναι η παραγωγή της νεροφακής σε υπόστρωμα υδατοκαλλιεργειών εξωτερικού χώρου στην Ελλάδα;
2. Είναι οικονομικά βιώσιμη η αντικατάσταση του βιοφίλτρου και του πρωτεϊνικού περιεχομένου της τροφής από την καλλιέργεια νεροφακής;

Δευτερεύοντα ερωτήματα

3. Ποιος είναι ο καλύτερος υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) για βέλτιστη παραγωγή;
4. Πόσο είναι το πρωτεϊνικό περιεχόμενο της παραγόμενης νεροφακής;
5. Τι προτιμά περισσότερο η νεροφακή NH_4^+ ή NO_3^- ;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Υλικά και Μέθοδοι

A ΜΕΡΟΣ

A.2. Πειραματικό μέρος

Το πείραμα έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ που έχουν έδρα στην περιοχή της Λυκόβρυσης, στην οδό Σοφοκλή Βενιζέλου 1. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα στο κύριο πείραμα, έπρεπε να προηγηθεί ένα προπείραμα καθώς και μια διαδικασία προσαρμογής της νεροφακής στις συνθήκες του κύριου πειράματος. Στο προπείραμα πραγματοποιήσαμε μια διεργασία διαλείποντος έργου (Batch), σε διάλυμα Hoogland (Hoogland solution) σε εξωτερικό χώρο, με σκοπό να ελεγχθεί αφενός η κινητική των ανόργανων ουσιών και αφετέρου να καθοριστεί ποια θα είναι η κατάλληλη αρχική βιομάζα που θα καλλιεργηθεί στο κύριο πείραμα. Το προπείραμα διήρκεσε 7 ημέρες. Έπειτα, ακολούθησε η διαδικασία προσαρμογής στις συνθήκες του κύριου πειράματος. Η διαδικασία κράτησε 28 ημέρες ώστε να συμβαδίσουμε χρονικά με την πορεία ανάπτυξης των βακτηρίων ενός βιοφίλτρου RAS. Το κύριο πείραμα διήρκεσε 11 ημέρες. Ο τύπος παραγωγής της καλλιέργειας ήταν ημι-συνεχής (semi-continuous) καλλιέργεια νεροφακής (*Lemna minor*), αναπτύχθηκε σε υδατοδεξαμενές (ponds) που βρισκόταν σε εξωτερικό χώρο. Για την πλήρωση των υδατοδεξαμενών χρησιμοποιήθηκε νερό βρύσης εμπλουτισμένο με συνθετικό διάλυμα ώστε τελικά το νερό να προσομοιάζει στη σύστασή του με αυτό που εξέρχεται από το μηχανικό φίλτρο ενός πραγματικού συστήματος RAS (νερό υδατοκαλλιέργειας). Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι το πείραμα έλαβε χώρα κατά τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο του 2021. Κατά τη διάρκεια του Ιουνίου η μέση θερμοκρασία ανήλθε σε 30,15°C ενώ τον Ιούλιο σε 33,79°C (meteoacharnes.gr/statistika/datasummary).

Έπειτα από 30 ημέρες προσαρμογής, μεταφέρθηκε συνολικά ποσότητα νεροφακής **840 g** σε 12 υδατοδεξαμενές (ponds) (**Εικόνες 14 & 15**). Η ποσότητα των 70 g ανά υδατοδεξαμενή επιλέχθηκε με στόχο να καλυφθεί όλη η επιφάνεια στις υδατοδεξαμενής. Στις 12 υδατοδεξαμενές προστέθηκε εμπλουτισμένο με συνθετικό υπόστρωμα νερό βρύσης όγκου **17,5 L** και συνολικά για στις στις δεξαμενές **210 L**. Το βάθος κάθε υδατοδεξαμενής ήταν 0,1 m, το μήκος 46 cm, το πλάτος 33 cm και η επιφάνεια 0,1518 m². Οι υδατοδεξαμενές χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με

την ποσότητα ημερήσιας συγκομιδής. Το επίπεδο 10% αντιστοιχεί σε ημερήσια συγκομιδή 7 g νεροφακής και το 30% σε 21 g. Κάθε επίπεδο συγκομιδής κατηγορία χωρίστηκε σε 3 διαφορετικούς χρόνους υδραυλικής παραμονής (HRT) που ανερχόταν σε 2, 4 και 6 ημέρες. Ως HRT αναφέρεται το μέσο χρονικό διάστημα που χρειάζεται, με δεδομένη ροή, για να πραγματοποιηθεί μία πλήρης ανακύκλωση του νερού στην υδατοδεξαμενή. Αυτό σημαίνει ότι στις 3 στις HRT γινόταν καθημερινή αντικατάσταση του μέσου ανάπτυξης (νερό) σε ποσοστό 50%, 25% και 16% αντίστοιχα (**Πίνακας 1**).

Η συγκομιδή ξεκίνησε από τη δεύτερη ημέρα έπειτα από την εγκατάσταση των καλλιεργειών στις 12 υδατοδεξαμενές. Την 6^η ημέρα του πειράματος προστέθηκαν 5 L νερού βρύσης σε κάθε υδατοδεξαμενή για να αναπληρωθεί η απώλεια νερού λόγω εξάτμισης.

Στις **εικόνες 12 και 13** παρατίθεται η χημική σύσταση του συνθετικού υποστρώματος υδατοκαλλιεργειών που προστίθεται στο μέσο ανάπτυξης (νερό) καθημερινά.

Εικόνα 12. Χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος του κύριου πειράματος του μέσου ανάπτυξης.

(φωσφορικά ιόντα)	2,5	mg-P/L
(νιτρικά ιόντα)	20	mg-N/L
(αμμωνιακά ιόντα)	5	mg-N/L
Ιχνοστοιχεία	0,5	mL/L
H ₃ BO ₃	2,86	g/L
MnCl ₂ *H ₂ O	1,82	g/L
ZnSO ₄ *7H ₂ O	0,22	g/L
Na ₂ MoO ₄ *H ₂ O	0,09	g/L
CuSO ₄ *5H ₂ O	0,09	g/L

Composition	Stock solution	¹ Final medium Used (mL/L of deionised water)
1. MgSO ₄ ·7H ₂ O	24.6 g/100mL	1.0
2. Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	23.6 g/100mL	2.3
3. KH ₂ PO ₄	13.6 g/100mL	0.5
4. KNO ₃	10.1 g/100mL	2.5
5. Micronutrients	Micronutrient Solution g/L (H ₃ BO ₃ , 2.86; MnCl ₂ ·4H ₂ O, 1.82; ZnSO ₄ ·7H ₂ O, 0.22; Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O, 0.09; CuSO ₄ ·5H ₂ O, 0.09)	0.5
6. Fe-EDTA	Fe-EDTA Solution g/250 mL (FeCl ₃ ·6H ₂ O, 0.121; EDTA, 0.375)	20.0

Εικόνα 13. Χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος (Hoagland solution) του μέσου ανάπτυξης στο πείραμα που προηγήθηκε του κύριου πειράματος.

Πίνακας 1. Υδραυλικοί χρόνοι παραμονής και ποσότητες συνθετικού υποστρώματος

HRT (ημέρες)	Ανά Ημέρα	Υδατικό συνθετικό υπόστρωμα	Μονάδες μέτρησης
2	50%	8.75	L
4	25%	4.375	L
6	16%	2.92	L



Εικόνα 14. Οι υδατοδεξαμενές με τη νεροφακή.



Εικόνα 15. Οι υδατοδεξαμενές με τη νεροφακή.

A.2.1. Μετρήσεις

A.2.1.1. Συσκευές

Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος έλαβαν χώρα μετρήσεις τόσο στη νεροφακή όσο και στο νερό στην επιφάνεια του οποίου αναπτυσσόταν. Όσον αφορά τη νεροφακή, μετρήθηκε η τελική παραγόμενη φυτική βιομάζα, καθώς και το πρωτεϊνικό περιεχόμενό της, ενώ παράλληλα μετρήθηκε το pH, το διαλυμένο οξυγόνο (DO), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και οι συγκεντρώσεις (κινητικές) των φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων του μέσου ανάπτυξης. Η μέτρηση του pH έγινε με πεχάμετρο (Hanna Instruments, pH 209) (**Εικόνα 15**) ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μετρήθηκε με τη συσκευή Cyberscan 200 (Eutech Instruments) (**Εικόνα 16**). Για τη φασματοφωτομετρία μοριακή απορρόφησης χρησιμοποιήθηκε το μοριακό φασματοφωτόμετρο DR LANGE CADAS 50 (**Εικόνα 17**) και για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) η συσκευή HQ40d (Hach Instruments) (**Εικόνα 18**).



Εικόνα 16. Το πεχάμετρο (Hanna Instruments, pH 209)



Εικόνα 17. Η συσκευή με την οποία μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) Cyberscan 200 (Eutech Instruments).



Εικόνα 18. Το μοριακό φασματοφωτόμετρο (DR LANGE CADAS 50)



Εικόνα 19. Η συσκευή με την οποία μετρήθηκε το διαλυμένο οξυγόνο (DO) (HQ40d, Hach Instruments).

A.2.2. Αναλυτικές μέθοδοι

A.2.2.1. Μέτρηση πρωτεϊνικού περιεχομένου

Οι πρωτεΐνες (ολικές) προσδιορίστηκαν εφαρμόζοντας φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης, ακολουθώντας τη μέθοδο Lowry (1951). Οι πρωτεΐνες εκχυλίστηκαν με χρήση διαλύματος 0.5N NaOH στους 100°C για 30 λεπτά. Για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα αλβουμίνης. Η φωτομέτρηση έγινε στα 750 nm. Το πρωτεϊνικό άζωτο υπολογίστηκε με βάση την περιεκτικότητα των ΑΠ σε πρωτεΐνες, θεωρώντας ότι η περιεκτικότητα αζώτου των πρωτεϊνών είναι 16%.

A.2.2.2. Μέτρηση Φωσφόρου

Ο φώσφορος προσδιορίστηκε με φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης ακολουθώντας τη μέθοδο ασκορβικού οξέος (4500-PE) σύμφωνα με τα πρότυπα των «Standard methods for the examination of water and wastewater» (APHA, 1995). Για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα K_2HPO_4 . Η φωτομέτρηση έγινε στα 880 nm.

A.2.2.3. Μέτρηση Αμμωνιακού και Νιτρικού αζώτου

Ο προσδιορισμός του αμμωνιακού αζώτου έγινε με φασματοφωτομετρία μοριακής απορρόφησης ακολουθώντας τη μέθοδο φαινόλης-υποχλωριώδους νατρίου (4500-F) σύμφωνα με τα πρότυπα των «Standard methods for the examination of water and wastewater» (APHA, 1995). Η εκχύλιση του αμμωνιακού αζώτου έγινε σε διάλυμα KCl 2M και H_2SO_4 0,1M. Για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα NH_4Cl . Η φωτομέτρηση έγινε στα 640 nm. Το νιτρικό άζωτο προσδιορίστηκε με την μέθοδο του σαλικυλικού-θεικού οξέος όπως περιγράφεται από τους (Robarge κ.ά., 1983). Για την κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα $NaNO_3$. Η φωτομέτρηση έγινε στα 410 nm.

Πίνακας 2. Εξισώσεις παλινδρόμησης των πρότυπων καμπυλών και R^2

	Εξίσωση παλινδρόμησης	R^2
NH_4-N	$y=0,6805x-0,0023$	0,9983
NO_3-N	$y=8,3375x+0,2183$	0,996
PO_4-P	$y=1,4115x-0,0078$	0,9984
P-Lowry	$y=864,17x-9,2449$	0,9916

Β ΜΕΡΟΣ

Β.2. Οικονομοτεχνική μελέτη

Β.2.1. Μεθοδολογία

Το δεύτερο κομμάτι του πειράματος αφορά το κατά πόσο η αντικατάσταση του βιοφίλτρου και του πρωτεϊνικού περιεχομένου της τροφής από τη νεροφακή σε μία μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας είναι βιώσιμη οικονομικά. Οι μέθοδοι αξιολόγησης και σύγκρισης είναι η ΚΠΑ (Καθαρή Παρούσα Αξία) και η ΕΣΑ (Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης), ενώ η αξιολόγηση κινδύνου θα γίνει με την ανάλυση ευαισθησίας. Η μονάδα που χρησιμοποιεί βιοφίλτρο αναφέρεται ως έργο BFR ενώ η μονάδα με τη νεροφακή ως έργο DWD.

Το χρονικό διάστημα της αξιολόγησης ορίστηκε στα 10 έτη ($n=10$), με γραμμική απόσβεση, χωρίς να υπάρχει υπολειμματική αξία, και θεωρώντας ότι όλη η παραγόμενη ποσότητα της τιλάπιας (εκτρεφόμενα ψάρια) θα διατεθεί στην αγορά. Οι συντελεστές ρίσκου είναι οι ίδιοι και για τα δύο είδη μονάδων RAS (BFR και DWD). Επιλέχθηκε η γραμμική απόσβεση (straight-line depreciation) χωρίς υπολειμματική αξία διότι είναι η πιο συνήθης που εφαρμόζουν οι επιχειρήσεις. Στην Ελλάδα προτιμάται αυτή χωρίς υπολειμματική αξία προς αποφυγήν υψηλότερης ετήσιας φορολογίας (Βασιλείου & Ηρειώτης, 2019).

Οι μέθοδοι αξιολόγησης που βασίζονται στην ΚΠΑ και τον ΕΣΑ είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες για αξιολόγηση επενδύσεων και συγκαταλέγονται στην ανάλυση προεξοφλημένων ταμειακών ροών (discount cash flow analysis) (Αραβώσης κ.ά., 2011; Βασιλείου & Ηρειώτης, 2019).

$$\text{Μαθηματικός τύπος ΚΠΑ: } \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+k)^t} - NCF_0$$

$$\text{Μαθηματικός τύπος ΕΣΑ: } NCF_0 = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+IRR)^t}$$

Η εύρεση της ΚΠΑ και του ΕΣΑ προϋποθέτει την κατάρτιση πινάκων με τις ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές των δύο έργων (BFR και DWD), την αναγωγή των ΚΤΡ σε παρούσα αξία και το άθροισμα αυτών.

Πίνακας 3 Υπολογισμός καθαρών ταμειακών ροών

1	Έσοδα
2	Έξοδα
3 = 1-2	Μεικτά κέρδη
4	Αποσβέσεις
5	Τόκοι
6 = 3-4-5	Φορολογητέο εισόδημα
7	Φόροι (%)
8 = 6-7	Καθαρά κέρδη μετά από φόρους
9 = 8+4	Καθαρή ταμειακή ροή μετά φόρων

B.2.2. Γενικά χαρακτηριστικά της μονάδας του έργου BFR

Τα δεδομένα που παρατίθενται πίνακες που ακολουθούν ελήφθησαν από τους Timmons κ.ά. (2018) και όπου θεωρήθηκε αναγκαίο έγινε μετατροπή των μονάδων μέτρησης στο διεθνές σύστημα S.I. Οι τιμές για το ηλεκτρικό ρεύμα, τη φορολογία, το συνάλλαγμα και τα αγροτεμάχια προσαρμόστηκαν στα ελληνικά δεδομένα (gov.gr/ipiresies/epikheirematike-drasterioteta/phorologia-epikheirseon).

Πίνακας 4. Οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας έργου BFR

Δεδομένα μονάδας	Μεγέθη	μοναδες
τιμη πώλησης/kg		3,78 € €
κοστος ηλ.€/KWh		0,28 € €
ετησια παραγωγη		1000 tn
εκταση κτιριων		75000 sqf
απόσβεση		10 γρ
φόροι		22,00%
απαιτούμενη απόδοση(k)		12,00%
ετήσια έσοδα		3.784.000,00 € €
ολικη έκταση		6968 m ²
δεξαμενες		16
ζεύγος δεξαμενών(rods)		8
διάμετρος δεξ.		7,6 m
ακτίνα δεξαμενής		3,8 m
ύψος		1,4 m
ογκος δεξαμενης		63,5 m ³
ολικος όγκος δεξαμενων		1016 m ³
κτήρια		2

Πίνακας 5. Κόστη επένδυσης μονάδας έργου BFR

Κόστος επένδυσης(BFR)	κόστος/ζεύγος	ολικό κόστος	μονάδες
κόστη/ζεύγος	172.000,00 €	1.376.000,00 €	€
εργατικό δυναμικό/κτίριο	172.000,00 €	344.000,00 €	€
κόστη επίβλεψης / ασφάλειας	64.500,00 €	64.500,00 €	€
κόστος κτιρίου	750.000,00 €	1.500.000,00 €	€
ολικό κόστος	1.158.500,00 €	3.284.500,00 €	€

Πίνακας 6. Κόστη παραγωγής μονάδας έργου BFR

	κόστος παραγωγής€/kg	Ολικό
κόστος ηλεκτρισμού	0,03 €	34.400,00 €
κόστος τροφής	1,10 €	1.100.800,00 €
κόστος θέρμανσης νερού	0,15 €	154.800,00 €
κόστος αερισμού	0,08 €	77.400,00 €
κόστος οξυγόνου	0,09 €	94.600,00 €
κόστος εργασίας	0,19 €	189.200,00 €
κόστος γόνου	0,11 €	111.800,00 €
ολικό κόστος	1,76 €	1.763.000,00 €
απόσβεση (€/kg)	0,34 €	
ολική απόσβεση	344.000,00 €	

Πίνακας 7. Βιοχημικά μεγέθη και δείκτες ιχθυομονάδας

Χαρακτηριστικά μονάδας	τιμή
Διαλυμένο οξυγόνο	5 mg/L
θερμοκρασία	28 °C
pH	7,2
Διοξειδίο του άνθρακα	20 mg/L
αμμωνιακό άζωτο	2 mg/L
νιτρικά	200 mg/L
ολικά στερα	15 mg/L
αριθμός τилаπιας	1000 tn/year
πρωτεϊνικό περιεχόμενο	36 %
τροφή/σωματικό βάρος	3,00% %
FCR	1,3

μεγιστη ιχθυοπυκνοτητα	120,0	kg/m ³
τροφή/μερα	85,7	kg feed/day
PO2	42,9	kg/day
PCO2	58,9	kg/day
P TAN	2,6	kg/day
P TSS	21,4	kg/day
αποδοτικότητα διεργασιας TE		C _{best}
αποδοση απομακρυνσης CO2	0,60	0,5
αποδοση απομακρυνσης TAN	0,50	0
αποδοση απομακρυνσης TSS	0,75	0
ικανοτητα μεταφορας O ₂	0,75	16

B.2.3. Γενικά χαρακτηριστικά της μονάδας του έργου DWD

B.2.3.1. Εισαγωγή

Η αντικατάσταση του βιοφίλτρου της ιχθυομονάδας από νεροφακή διαμορφώνει εκ νέου τόσο το επενδυτικό κόστος όσο και το κόστος παραγωγής. Σε ότι αφορά το κόστος επένδυσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη το κόστος του βιοφίλτρου, η αγορά γης στην οποία θα τοποθετηθεί η υδατοδεξαμενή της νεροφακής, το κόστος του ξηραντήρα της νεροφακής ο οποίος για να καλύπτει τις ανάγκες συχνά θα πρέπει να είναι βιομηχανικού επιπέδου.

Ως προς το κόστος παραγωγής, η διαφορά σε σχέση με τη μονάδα με βιοφίλτρο έγκειται στην οικονομική επιβάρυνση που αντιστοιχεί στη νεροφακή για να μη μειωθεί το πρωτεϊνικό περιεχόμενο της τροφής που χορηγείται στα εκτρεφόμενα ψάρια, καθώς και επιπλέον εργατικό δυναμικό που απαιτείται για τη διαχείριση της νεροφακής. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι και άλλοι παράγοντες

συμβάλλουν στη διαμόρφωση του κόστους, ωστόσο, στην παρούσα εργασία, για λόγους που θα αναφερθούν στη συνέχεια, δεν θα ληφθούν υπόψη.

B.2.3.2. Διευκρινίσεις

Η χρήση της νεροφακής στο κλειστό σύστημα μπορεί να επιφέρει αρκετές αλλαγές στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, στην παρούσα μελέτη δεν θα ληφθούν όλες υπόψη, όπως για παράδειγμα η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από συσκευές (π.χ. ροή απαερωτή) που υπάρχουν τόσο στο έργο BFR όσο και στο έργο DWD. Όταν λειτουργεί το βιοφίλτρο, προκαλεί αύξηση της κατανάλωσης DO και επομένως το σύστημα επιβαρύνεται. Η νεροφακή, όπως είναι γνωστό από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τις μετρήσεις στην παρούσα μελέτη, αυξάνει το διαθέσιμο DO. Παρόλα αυτά, δεν είναι σαφές το κατά πόσο μεγαλύτερη θα ήταν η αποδοτικότητα αυτή και το αν χρειάζεται συμπλήρωση DO από οξυγονωτή. Ως εκ τούτου, η ροή δεν θα ληφθεί υπόψη. Η παραγωγή CO₂ παρότι αυξάνεται με την εφαρμογή του βιοφίλτρου (λόγω της παρουσίας βακτηρίων) ενώ με τη νεροφακή μειώνεται (λόγω φωτοσύνθεσης), η απουσία μετρήσεων και δεδομένων στην παρούσα εργασία, μας οδηγεί στο να μην λάβουμε υπόψη την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία θεωρούμε ότι παραμένει ίδια ανεξαρτήτως από το ποιες συσκευές χρησιμοποιούνται στα δύο έργα.

Εν κατακλείδι, στην παρούσα εργασία θα θεωρηθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο έργων θα προκύψουν μόνο από την αλλαγή στο κόστος της ιχθυοτροφής και στο απασχολούμενο εργατικό προσωπικό του έργου που αντιστοιχεί στη χρήση νεροφακής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αποτελέσματα

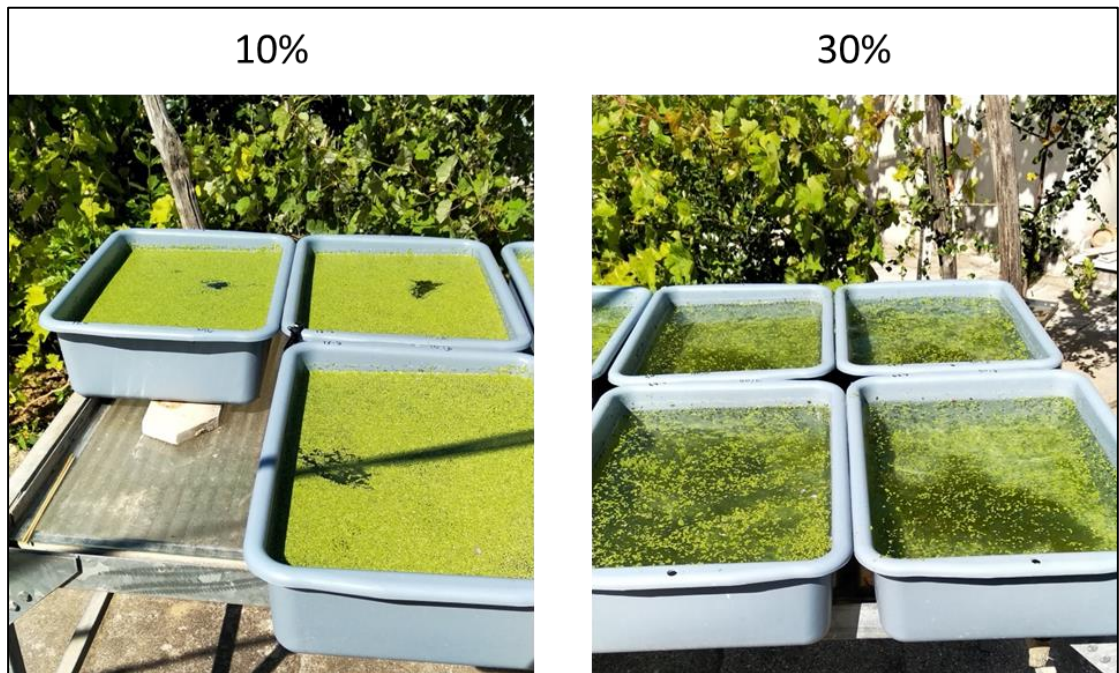
Α ΜΕΡΟΣ

Α.3. Αποτελέσματα πειραματικού μέρους

Α.3.1. Παραγωγή βιομάζας

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, προέκυψαν δύο προβλήματα:

- Στις υδατοδεξαμενές με την ημερήσια συγκομιδή της νεροφακής στο επίπεδο του 30% της αρχικής βιομάζας και στους 3 διαφορετικούς HRT, ήδη από την τέταρτη μέρα του πειράματος η συγκομιζόμενη βιομάζα ήταν πολύ λιγότερη από την απαιτούμενη και δεν αναπτυσσόταν καθόλου. Συνεπώς, ήταν αδύνατο να γίνουν οι περαιτέρω αναλύσεις που αφορούσαν το πείραμα (**Εικόνα 20**).
- Στις υδατοδεξαμενές με την ημερήσια συγκομιδή στο επίπεδο του 10% της αρχικής βιομάζας, η τελική ποσότητα βιομάζας ήταν λιγότερη από την αρχική ποσότητα (Αβ) και στους 3 διαφορετικούς HRT (**Εικόνα 20**).

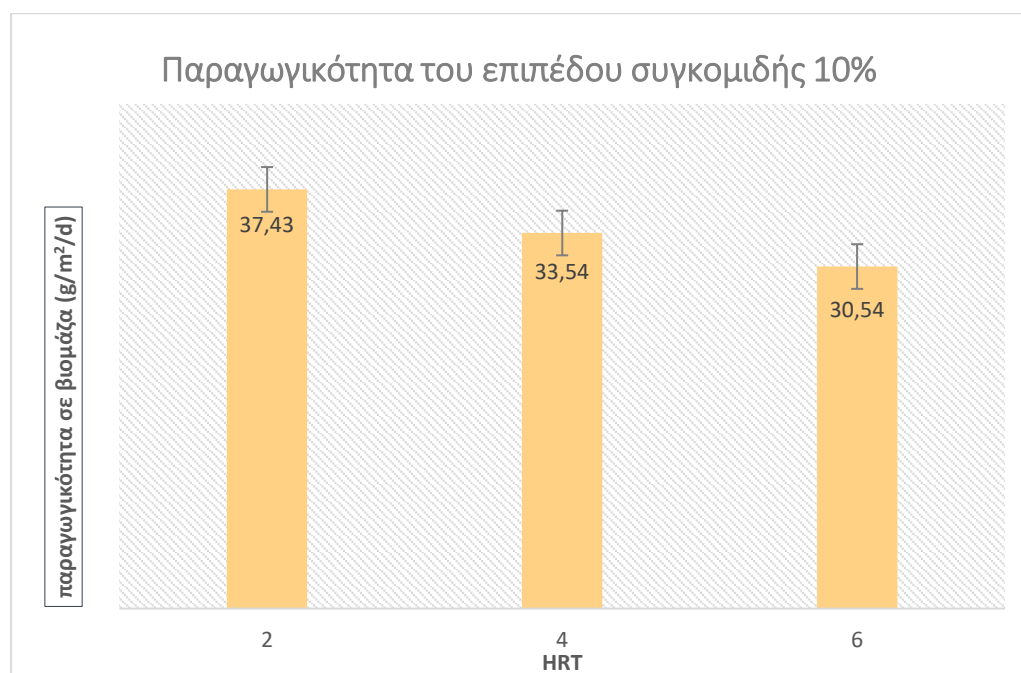


Εικόνα 20. Η φυτική κάλυψη των υδατοδεξαμενών στα 2 επίπεδα συγκομιδής την 6η ημέρα. Είναι φανερή η αδυναμία της νεροφακής του επιπέδου 30% να καλύψει την επιφάνεια της δεξαμενής.

Πίνακας 8. Μέσες τιμές ποσοτήτων βιομάζας από κάθε δεξαμενή όπως καταγράφηκαν την τελευταία μέρα

biomass 10%										
HRT	2			4			6			
sample a	a	54	gr	a	50	gr	a	48	gr	
sample b	b	57	gr	b	48	gr	b	40	gr	
Average		55,5	gr		49	gr		44	gr	

Διάγραμμα 1. Η παραγωγή βιομάζας σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT, ημέρες)



Από τα δεδομένα του **πίνακα 8** και του **διαγράμματος 1** γίνεται αντιληπτό ότι στην υδατοδεξαμενή με HRT 2 παράχθηκε η μεγαλύτερη τελική ποσότητα βιομάζας (T_B). Συνεπώς, έπρεπε να βρεθεί μία νέα βέλτιστη συγκομιδή. Αν υπολογίσουμε ότι $\frac{(A_B - T_B)}{11} = 1,32 \text{ gr}$ η απώλεια βιομάζας κάθε μέρα και ότι αρχική συγκομιδή ήταν 7 g, τότε πλέον η βέλτιστη ημερήσια συγκομιδή διαμορφώνεται στα $7 - 1,32 = 5,7 \text{ g}$ ή $\approx 8\%$. Άρα, με βάση τη συνολική επιφάνεια του πειράματος, η παραγωγή ανήλθε σε $37,43 \text{ g /m}^2 \text{ /d}$ ή αλλιώς 374 kg /ha /d νωπής βιομάζας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ξηρή βιομάζα αποτελεί το 5% της νωπής, θα παραχθεί ετήσια ξηρή βιομάζα της τάξης των **6550,2 kg /ha ή 6,55 tn /ha**.

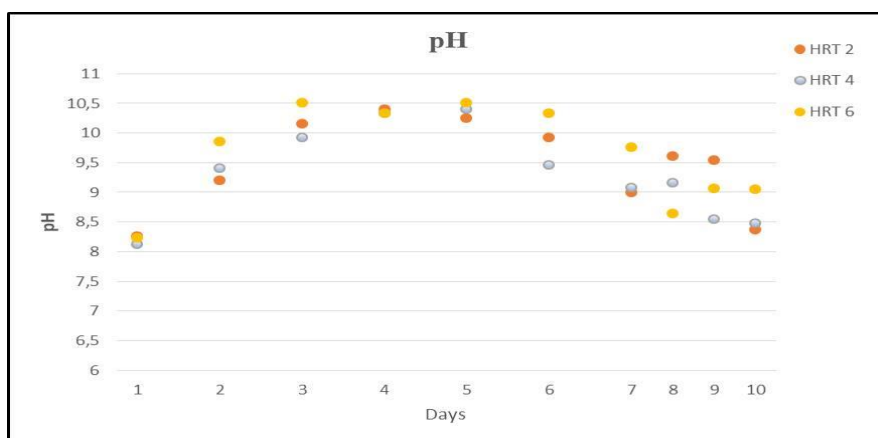
Η παραγωγή αυτή είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που αναφέρεται στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, η Rejmankova (1979) παρατήρησε

παραγωγή βιομάζας **7,5-8 tn /ha**, οι Culley κ.ά. (1978) 25 tn /ha και οι Edwards κ.ά. (1992) **20 tn /ha**. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στην Ευρώπη, η ετήσια παραγωγή βιομάζας σε υδατοκαλλιέργειες εξωτερικού χώρου, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ **7 και 22 tn /ha** (Devlamynck κ.ά., 2020). Επίσης, έχουν αναφερθεί και ακόμα μεγαλύτερες συγκομιζόμενες ποσότητες, καθώς οι Paolacci κ.ά. (2019), χρησιμοποιώντας συνθετικό υπόστρωμα υδατοκαλλιεργειών, σημείωσε ετήσια παραγωγή **40 tn /ha**, ενώ οι Calicioglu κ.ά. (2021) κατέγραψαν ως μέγιστη ετήσια παραγωγή αυτή των **70 tn /ha**. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να οφείλεται στην αρνητική σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην πυκνότητα και την ανάπτυξη της νεροφακής. Η κατάλληλη πυκνότητα της νεροφακής πρέπει να προσεγγίζεται πειραματικά καθώς κάθε ερευνητής ακολουθεί και διαφορετική πειραματική διαδικασία και σε διαφορετικό περιβάλλον (Skillicorn κ.ά., 1993; Iqbal, 2012; Lasfar κ.ά., 2007; Paolacci κ.ά., 2019). Επιπλέον, οι καλοκαιρινοί μήνες, κατά τους οποίους σημειώνονται ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες και εντάσεις φωτός, που έχουν μεγάλη διάρκεια, και είναι παράγοντες που δρουν ανασταλτικά για την παραγωγή βιομάζας (Walsh κ.ά., 2021; Patel & Kanungo, 2010; Chakrabarti κ.ά., 2018).

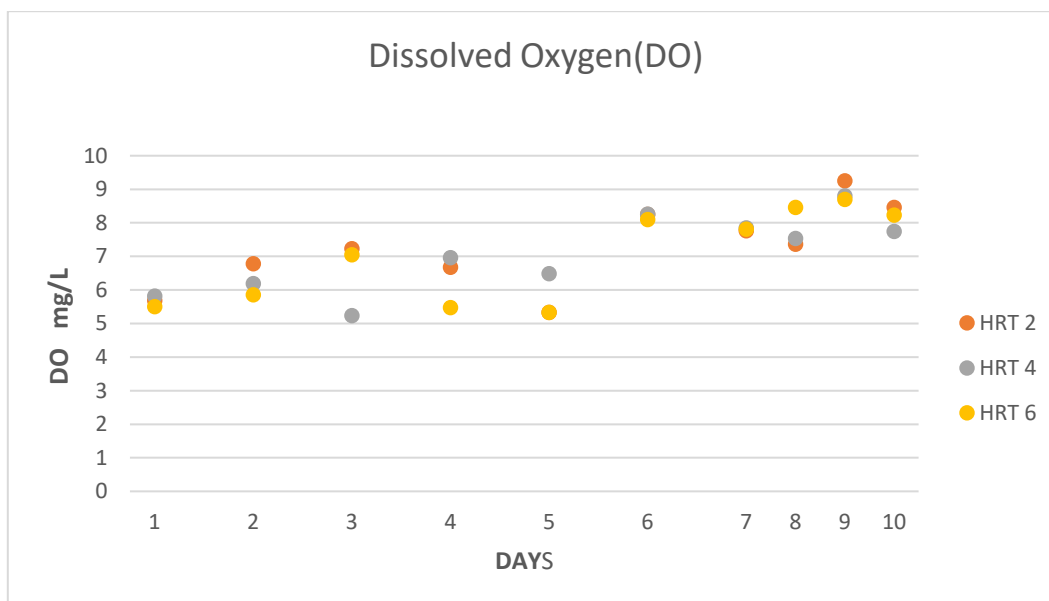
A.3.2. Η διαμόρφωση του pH και του διαλυμένου οξυγόνου (DO).

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται η διαμόρφωση του pH και του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο μέσο ανάπτυξης (νερό) της νεροφακής. Το pH επηρεάστηκε σημαντικά φτάνοντας μάλιστα και έως τη μέγιστη τιμή του 10,5. Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο κυμάνθηκε από 5 ως 9 mg/L, το οποίο σημαίνει ότι η νεροφακή συμβάλλει ικανοποιητικά στον επαρκή αερισμό του μέσου ανάπτυξης. Ο κορεσμός του οξυγόνου στην έναρξη του πειράματος (στους 25⁰C) ήταν κανονικός (8.2mg/L).

Διάγραμμα 2. Η διαμόρφωση του pH του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT)



Διάγραμμα 3. Η διαμόρφωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT)

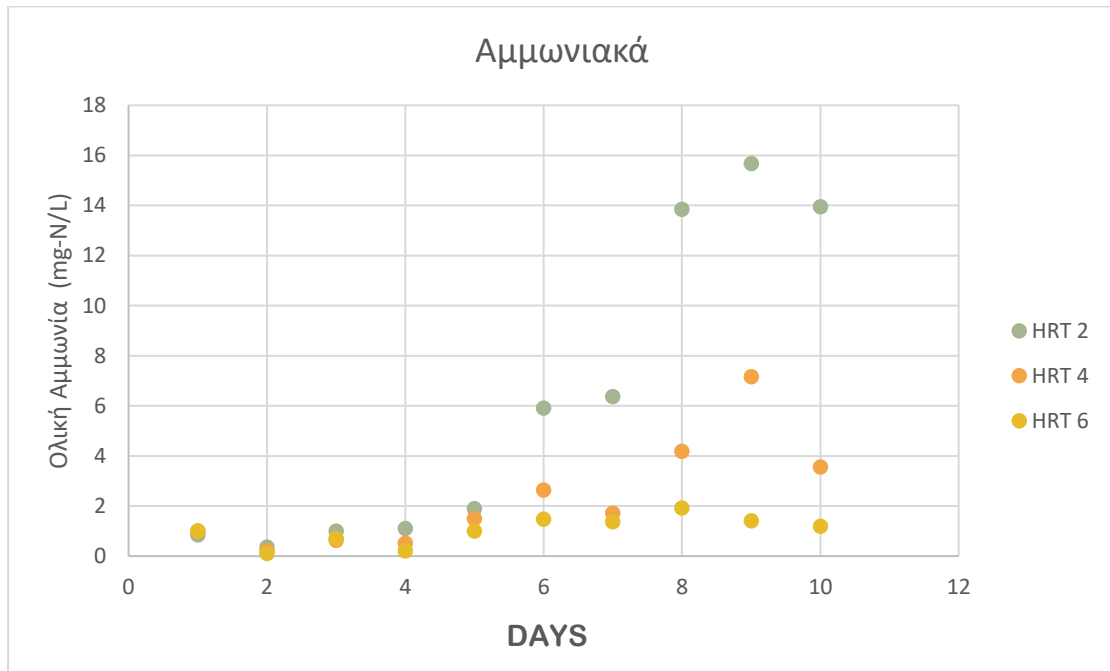


A.3.3. Αμμωνιακά, νιτρικά και φωσφορικά ιόντα.

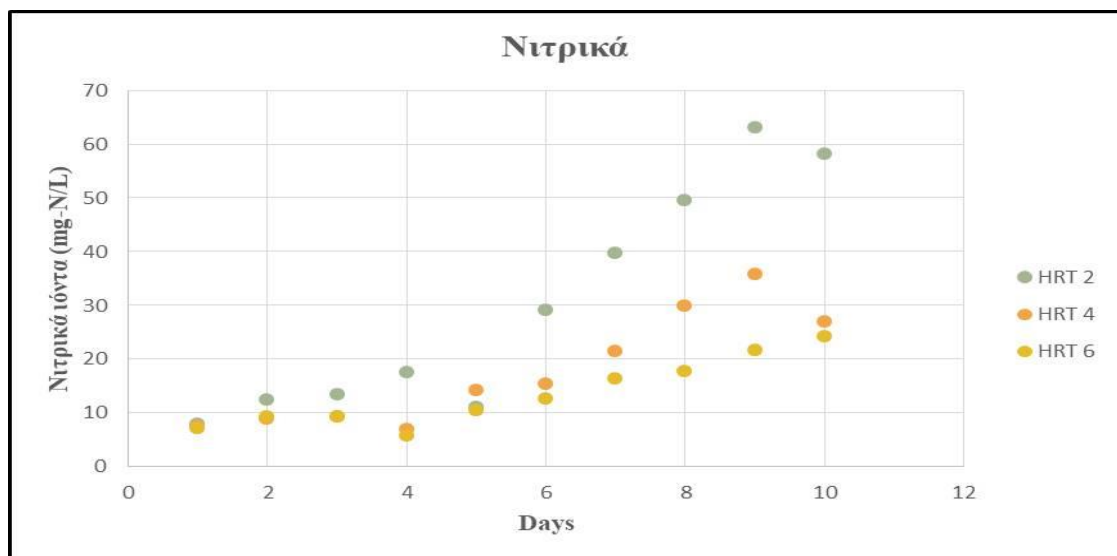
Όσον αφορά τη συγκέντρωση αμμωνιακών, νιτρικών και φωσφορικών ιόντων στο μέσο ανάπτυξης της νεροφακής, παρατηρήθηκε μία συσσώρευση των προηγούμενων, ειδικά όταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ήταν 2 ημέρες (HRT 2). Το γεγονός αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι η καθημερινή ανανέωση του 50% της ποσότητας του νερού (μέσο ανάπτυξης), προκάλεσε αύξηση της συγκέντρωσης των εν λόγω θρεπτικών συστατικών σε τέτοιο βαθμό που κατέστησε αδύνατη την πρόσληψή τους από τα φυτά της νεροφακής. Οι τιμές συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου, εφόσον είναι κάτω από το όριο των 50 mg/L (Timmerman & Hoving, 2016), δεν είναι απαγορευτικές για την ανάπτυξη της νεροφακής.

Οι αρχικές ποσότητες των ιόντων δεν είναι απαγορευτικές για την ανάπτυξη της νεροφακής και την ικανότητά της να εξυγιαίνει το μέσο ανάπτυξης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το βέλτιστο επίπεδο συγκέντρωσης αζώτου για μια ικανή ποσότητα παραγωγής φυτικής βιομάζας είναι περίπου 30 mg/L (Wang κ.ά., 2016).

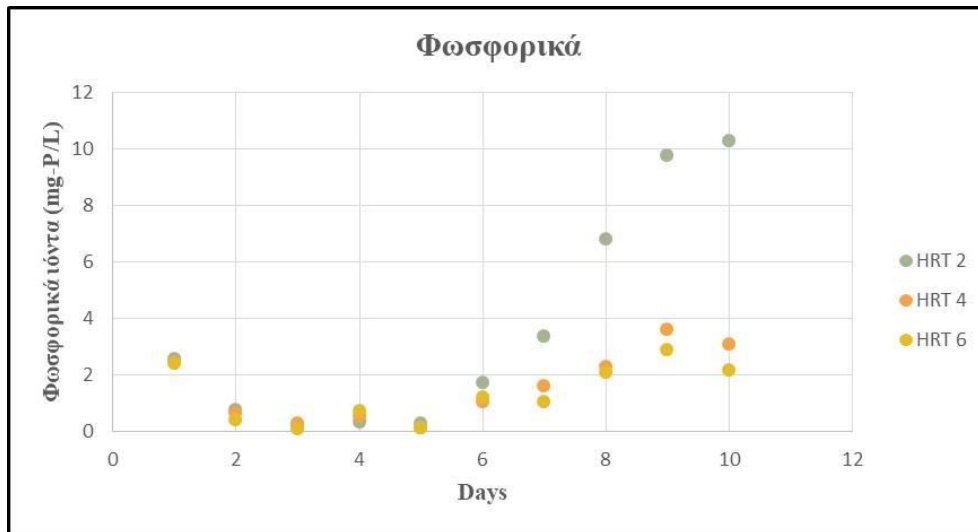
Διάγραμμα 4. Η συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής



Διάγραμμα 5. Η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής



Διάγραμμα 6. Η συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων του μέσου ανάπτυξης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής



Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών, φωσφορικών και νιτρικών ιόντων, παρά την προοδευτική μείωσή τους, που ξεκίνησε από την πρώτη κιάλας ημέρα καλλιέργειας, από την 6η ημέρα και έπειτα άρχισαν να αυξάνονται. Η τάση αυτή ίσως οφείλεται στην απώλεια νερού λόγω εξάτμισης (αυτό εκτιμούν και οι Devlamynck κ.ά., 2020) ή/και στο υψηλό pH που σταδιακά διαμορφώθηκε, το οποίο ίσως συνέβαλε με τη σειρά του στη θνητότητα της νεροφακής. Για να συνεχιστεί απρόσκοπτα η εξυγίανση του νερού από τη δράση της νεροφακής, οι Paolacci κ.ά. (2020) αναφέρουν ότι το pH πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 6 και 8 αν η καλλιέργεια αναπτύσσεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι Caicedo κ.ά. (2000) προτείνουν ως αποδεκτό εύρος pH το 5-8, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις τιμές pH που κατεγράφησαν στην παρούσα εργασία, οι οποίες ήταν πολύ μεγαλύτερες. Πολύ πιθανό, βέβαια, είναι, η συσσώρευση θρεπτικών στοιχείων που έλαβε χώρα να οφείλεται εν μέρει στις υψηλές θερμοκρασίες (Ruigrok, 2015) που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια του πειράματος αλλά και σε άλλους αβιοτικούς παράγοντες (Petersen κ.ά., 2021). Η αύξηση της θερμοκρασίας δρα ανασταλτικά στην ανάπτυξη της νεροφακής καθώς επηρεάζει πολλές φυσικοχημικές διεργασίες (Landolt & Kandeler, 1987; Lasfar κ.ά., 2007).

Ο συνδυασμός των υψηλών τιμών pH, που ίσως οφείλεται στην φωτοσύνθεση όχι μόνο της νεροφακής αλλά και άλλων οργανισμών (Paolacci κ.ά., 2020), η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) (άρα αερόβιες συνθήκες), η νιτροποίηση καθώς και η καταγεγραμμένη προτίμηση του αμμωνιακού αζώτου έναντι του νιτρικού μπορούν εν μέρει να εξηγήσουν τη μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων πέρα

από τη σταδιακή συσσώρευση. Η παρατηρούμενη μείωση της συγκέντρωσης του μέσου ανάπτυξης σε αμμωνιακό άζωτο στην παρούσα πειραματική διαδικασία επιβεβαιώνει την προτίμηση της νεροφακής σε αμμωνιακό άζωτο έναντι του νιτρικού. Η συσσώρευση όλων των θρεπτικών ιόντων πιθανά να οφείλεται στις συνθήκες ανάπτυξης και να είναι αποτέλεσμα συνδυαστικής δράσης πολλών παραγόντων (αβιοτικοί παράγοντες, θερμοκρασία, HRT, pH κ.ά.) παρά στην ποσότητα των θρεπτικών, όπως αναφέρουν οι Timmerman & Hoving (2016) και Caicedo κ.ά. (2000).

Σε τιμές pH κοντά στο 10 η ικανότητα απομάκρυνσης ουσιών από τη νεροφακή καθίσταται αδύνατη, πράγμα το οποίο συνέβη και στο παρόν πείραμα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους Körner κ.ά. (2001).

Η αύξηση του pH, που είναι φυσικό επακόλουθο της νιτροποίησης, σε συνδυασμό με την προτίμηση από τη νεροφακή των αμμωνιακών έναντι των νιτρικών (Skillicorn κ.ά., 1993; Zhao κ.ά., 2014; Zhang κ.ά., 2014; Cedergreen & Madsen, 2002) και την ύπαρξη αερόβιων συνθηκών δύνανται να εξηγήσουν τη μεγάλη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων πέραν του φαινομένου της συσσώρευσης.

A.3.4. Πρωτεϊνικό περιεχόμενο

Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 9**) παρατίθεται το πρωτεϊνικό περιεχόμενο της νεροφακής σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT). Είναι φανερό ότι στον HRT 2, όπου σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών, επετεύχθη η μέγιστη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, μέτρηση που έρχεται σε συμφωνία με τους Khvatkov κ.ά. (2019) και τους Paolacci κ.ά. (2020), πάντα συγκριτικά με τους HRT 4 και 6, στους οποίους η παραγόμενη πρωτεΐνη δεν διέφερε σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, μιας και το ποσοστό της πρωτεΐνης που παράχθηκε ήταν άνω του 30%, γίνεται αντιληπτό ότι η νεροφακή μπορεί να αποτελέσει μία αξιόλογη πηγή πρωτεϊνών. Στην παρούσα εργασία, αυξανόμενη της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων, αυξήθηκε και η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, κάτι που κατέγραψαν και οι Timmerman & Hoving (2016). Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε το ίδιο και από τους Modehano κ.ά. (2012), οι οποίοι διαπίστωσαν αρνητική σχέση μεταξύ της πυκνότητας της νεροφακής (η οποία ευνοείται από την παρουσία περίσσειας θρεπτικών στοιχείων) και της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη.

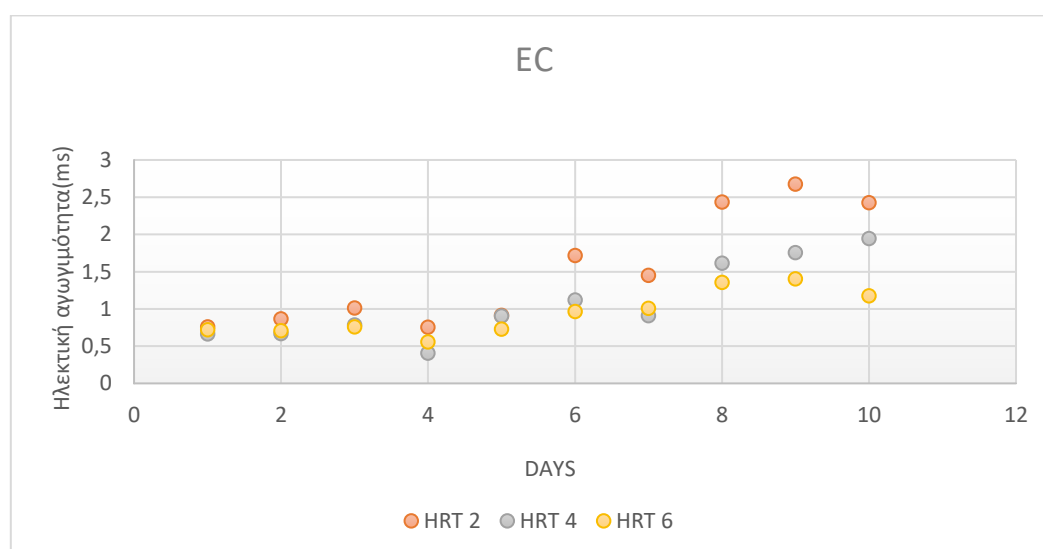
Οι Walsh κ.ά. (2021) παρατήρησαν ότι η πυκνότητα της νεροφακής δεν επηρεάζει το ποσοστό πρωτεΐνης που περιέχουν τα φυτά της νεροφακής, κάτι που συμφωνεί και με τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, στην οποία το ποσοστό

πρωτεΐνης καθορίστηκε κυρίως από την ποσότητα των θρεπτικών συστατικών. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα συμφωνούν και με αυτά των Petersen κ.ά. (2021).

Πίνακας 9. Η συνολική παραγωγή πρωτεΐνης σε σχέση με τους 3 υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT)

HRT	Πρωτεϊνικό περιεχόμενο (%)
2	36.1
4	30.3
6	29.1

Διάγραμμα 7. Ημερήσια διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο μέσο ανάπτυξης για κάθε HRT



Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ενός διαλύματος αντικατοπτρίζει την ικανότητά του να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα, και είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του διαλύματος σε ηλεκτρολύτες, δηλαδή ενώσεις που μπορούν και δίστανται όταν βρεθούν στο νερό. Απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ένα υδατικό διάλυμα αποτελεί ένδειξη ρύπανσης, καθώς σημαίνει ότι έχει αυξημένη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο για εμφάνιση ευτροφισμού (Κλαουδάτος, 2010).

Τέτοια τάση παρατηρήθηκε και στο παρόν πείραμα. Τις πρώτες ημέρες του πειράματος οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μέσου ανάπτυξης διατηρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα. Στη συνέχεια όμως, καθώς η συσσώρευση των θρεπτικών συστατικών εντεινόταν, παρατηρήθηκε και η ανάλογη αύξηση της

ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι τιμές γενικά κυμάνθηκαν από περίπου 0,5 ως 3 mS/cm. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι καθοριστική για την παραγωγή βιομάζας, επηρεάζοντας ποικίλες βιοχημικές και φυσιολογικές διεργασίες στα φυτά (Iqbal & Javed, 2017). Σε στάσιμα νερά αγωγιμότητα ηλεκτρολυτών σε τιμές 400-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έχει βρεθεί ιδανική για τα είδη *Lemna minor* και *Lemna gibba* ώστε αυτά να παράγουν τη μέγιστη ποσότητα βιομάζας, ενώ για άλλα είδη το εύρος αυτός φαίνεται μεγαλύτερο (650-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Στο παρόν πείραμα σημειώθηκαν, λοιπόν, πολύ μεγαλύτερες τιμές, αναδεικνύοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα ως ακόμη ένα παράγοντα που συνέβαλε στη μειωμένη παραγωγή βιομάζας.

B ΜΕΡΟΣ

B.3. Ανάλυση κόστους επένδυσης του έργου DWD

B.3.1. Βιοφίλτρο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν πολλά είδη βιοφίλτρων, με χαρακτηριστικά που ποικίλουν. Στην παρούσα μελέτη επελέχθησαν ως βιοφίλτρα τα φίλτρα καταιονισμού (trikling filters), που είναι από τα πιο ευρέως διαδεδομένα, είναι εύκολο στην εφαρμογή και τη διαστασολόγησή του. Το κόστος του εκάστοτε βιοφίλτρου δεν είναι σταθερό αλλά επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις του. Η διαδικασία καθορισμού των διαστάσεων αποτελεί μια εμπειρική διαδικασία (Eding κ.ά., 2006), σχετικά με την οποία τα δεδομένα είναι ελλιπή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ως κόστος αναφοράς το κόστος μιας άλλης μονάδας τιλάπιας, διαφορετικής δυναμικότητας (454tn/year) από αυτή στην οποία αναφέρονται οι Timmons κ.ά. (2018), και εφαρμόστηκε ο τύπος του «υπολογισμού κόστους εξοπλισμού με κλιμάκωση μεγέθους»

$$\text{Κόστος εξοπλισμού } a = (\text{κόστος εξοπλισμού } b) * (X)^{0,6} \quad (2.4.1.)$$

Ως a αναφέρεται η ζητούμενη μονάδα, ως b η γνωστή σε εμάς μονάδα και X η σχέση μεταξύ των δυο δυναμικοτήτων. Ο συντελεστής 0,6 χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες (Peters κ.ά., 2018).

$$\text{Κόστος εξοπλισμού } a = 533.200\text{€} * (2.2)^{0,6} \rightarrow \text{Κόστος εξοπλισμού } a = \mathbf{856.360,50\text{€}}$$

B.3.2. Κόστος ξηραντήρα

Τα στοιχεία για το ξηραντήρα ελήφθησαν από τον ιστότοπο https://www.alibaba.com/product-detail/Machine-Fruit-Fruit-Drying-Machine-Dehydrator_60464889347.html?s=p και ανέρχονται σε **10.311,52€**.



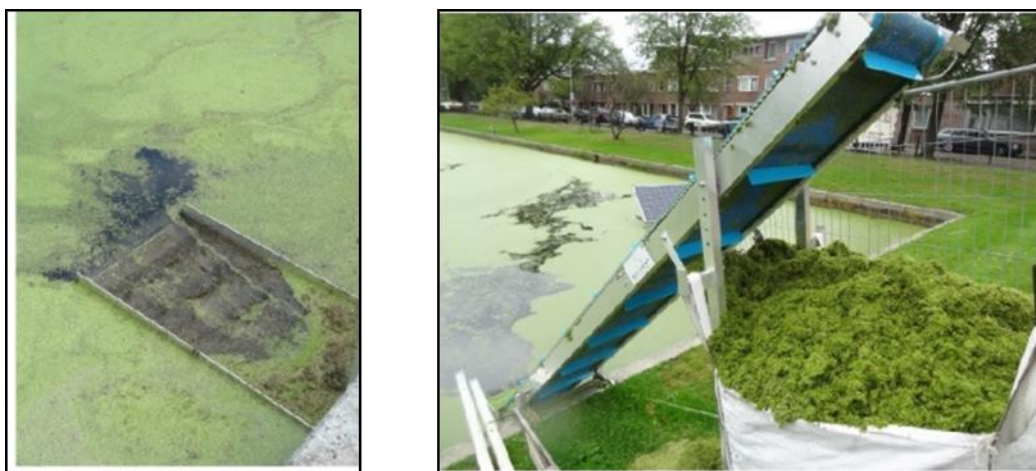
Εικόνα 21. Ξηραντήρας για την αποξήρανση των φυτών της νεροφακής.

B.3.3. Κόστος γης

Το κόστος μίσθωσης ενός αγροτεμαχίου ποικίλει από περιοχή σε περιοχή. Επίσης, ο καθορισμός του επηρεάζεται κι από άλλες παραμέτρους. Για παράδειγμα, μια περιοχή κατάλληλη για εγκατάσταση υδατοκαλλιέργειας βρίσκεται στο Μενίδι Αιτωλοακαρνανίας. Διαθέτει παροχή αρδευόμενου νερού και εφάπτεται στη θάλασσα. Το κόστος ενοικίου γης στην εν λόγω περιοχή ανέρχεται στα **11,38 €/m²** (ΑΑΔΕ/Εκτιμήσεις ακινήτων). Προκειμένου να υπολογίσουμε την απαιτούμενη επιφάνεια γης και το αντίστοιχο κόστος για μια περίοδο δέκα ετών, πρέπει πρώτα να εκτιμήσουμε πόσα στρέμματα γης χρειάζονται ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ημερήσια συγκομιδή, η οποία να ικανοποιεί τις ημερήσιες ανάγκες των ψαριών σε πρωτεΐνη. Σύμφωνα με τους παρακάτω υπολογισμούς, αν λάβουμε υπόψη το πρωτεϊνικό περιεχόμενο της τροφής (36%), την ετήσια χορηγούμενη ποσότητα πρωτεΐνης (10.8 tn) και την ετήσια παραγωγή που επετεύχθη, η έκταση που χρειάζεται είναι $10.8 \text{ tn} / 6.55 \text{ tn/ha} = \mathbf{1.65 \text{ ha}}$. Επομένως, το κόστος γης ανέρχεται σε **300.223,51 €**.

B.3.4. Κόστος μηχανήματος συγκομιδής

Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων, επιλέχθηκε μία από τις πιο συνηθισμένες και εύχρηστες, η οποία γίνεται με το μηχάνημα “Duckweed guzzler with belt”, του οποίου το κόστος ανέρχεται στα **20.000€** (Timmerman & Hoving, 2016).



Εικόνα 22. Μηχάνημα συγκομιδής της νεροφακής. “Duckweed guzzler with belt”

B.3.5. Κόστος παραγωγής του έργου DWD

B.3.5.1. Κόστος τροφής με χρήση νεροφακής (έργο DWD)

Η τροφή, όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές παραπάνω, είναι ένας από τους πιο δαπανηρούς συντελεστές παραγωγής σε μια ιχθυομονάδα. Περίπου το 50% του κόστους της τροφής διαμορφώνεται από την περιεχόμενη πρωτεΐνη (Abdel-Fattah El-

Sayed, 2019). Με βάση αυτό ως δεδομένο, και σε συνάρτηση με τα στοιχεία της μονάδας (κόστος τροφής **1.100.800€**), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το κόστος της τροφής όταν χρησιμοποιείται νεροφακή ανέρχεται σε **550.400,00 €**.

B.3.5.2. Κόστος εργατικού προσωπικού με χρήση νεροφακής (έργο DWD)

Η διαφορά στον κύκλο εργασιών που προκύπτουν από τη χρήση της νεροφακής είναι η μεταφορά της στον ξηραντήρα και έπειτα στο σιλό της τροφής. Οι διαδικασίες αυτές συνήθως απαιτούν την πρόσληψη ενός ανειδίκευτου εργάτη με τετράωρη εργασία ημερησίως. Δεδομένου του ότι ωρομίσθιο είναι 29,6€/ημέρα και οι κρατήσεις 14,54%, το καθαρό ετήσιο κόστος είναι 5.840,80€. Αν σε αυτό το ποσό προστεθούν και οι αντίστοιχες ασφαλιστικές κρατήσεις (23,02%) οι οποίες είναι 1.573,25€, τότε το τελικό κόστος ανέρχεται σε $5.840,80€ + 1.573,25€ = 7.414,05€$ (<https://ypergasias.gov.gr/ergasiakes-scheseis/syllogikes-ergasiakes-sxeseis/katotatos-misthos/>).

B.3.5.3. Σύνοψη

Στους παρακάτω πίνακες συνοψίζονται τα οικονομικά στοιχεία του έργου DWD.

Πίνακας 10. Κόστη επένδυσης μονάδας έργου DWD

κόστος επένδυσης DWD	ολικό κόστος
κόστος επένδυσης BFR	3.284.500,00 €
κόστος βιοφίλτρου	856.350,50 €
κόστος επένδυσης χωρίς βιοφίλτρο	2.428.149,50 €
κόστος γης	300.223,51 €
κόστη μηχανήματος συγκομοιδής	20.000,00 €
κόστος ξηραντήρα	10.311,52 €
ολικό κόστος	2.758.684,53 €

Πίνακας 11. Κόστη παραγωγής μονάδας έργου DWD

κόστος παραγωγής Έργου DWD	
κόστος ηλεκτρισμού	34.400,00 €
κόστος τροφής με νεροφακή	550.400,00 €
κόστος θέρμανσης νερού	154.800,00 €
κόστος αερισμού	77.400,00 €
κόστος οξυγόνου	94.600,00 €
κόστος εργασίας	189.200,00 €
κόστος γόνου	111.800,00 €
εργασία συγκομοιδής	7.414,05 €
ολικό κόστος	1.220.014,05 €

B.3.6. Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής σύγκρισης των έργων BFR και DWD

Πίνακας 12. Οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων που χρησιμοποιούν βιοφίλτρο (έργο BFR) Υπολογισμός KTP

Έργο BFR	ΕΤΗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Εσοδα	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €	3.784.000,00 €
2	Εξοδα	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €	1.763.000,00 €
3	Μεικτά κέρδη	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €	2.021.000,00 €
4	Αποσβέσεις	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €	344.000,00 €
5	Φορολογητέο εισόδημα	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €	1.677.000,00 €
6	Φόροι	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €	368.940,00 €
7	Κέρδη μετά φόρων	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €	1.308.060,00 €
8	καθαρή ταμειακή ροή	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €	1.652.060,00 €

Πίνακας 13. Οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων που χρησιμοποιούν νεροφακή (έργο DWD) Υπολογισμός KTP

Έργο DWD	ΕΤΗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Εσοδα	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000	3784000
2	Εξοδα	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05	1220014,05
3	Μεικτά κέρδη	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95	2563985,95
4	Αποσβέσεις	344000	344000	344000	344000	344000	344000	344000	344000	344000	344000
5	Φορολογητέο εισόδημα	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95	2219985,95
6	Φόροι	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909	488396,909
7	Κέρδη μετά φόρων	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041	1731589,041
8	Καθαρή ταμειακή ροή	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041	2075589,041

Πίνακας 14. Υπολογισμός ΚΠΑ και ΕΣΑ του έργου BFR

ΕΤΗ	ΕΡΓΟ BFR	Παρουσα αξία
0	- 3.284.500,00 €	- 3.284.500,00 €
1	1.652.060,00 €	1.475.053,57 €
2	1.652.060,00 €	1.317.012,12 €
3	1.652.060,00 €	1.175.903,68 €
4	1.652.060,00 €	1.049.914,00 €
5	1.652.060,00 €	937.423,21 €
6	1.652.060,00 €	836.985,01 €
7	1.652.060,00 €	747.308,04 €
8	1.652.060,00 €	667.239,33 €
9	1.652.060,00 €	595.749,40 €
10	1.652.060,00 €	531.919,11 €
	Συνολο Π.Α.	9.334.507,46 €
	Κ.Π.Α	6.050.007,46 €
	Ε.Σ.Α	49%

Πίνακας 15. Υπολογισμός ΚΠΑ και ΕΣΑ του έργου BFR

ΈΤΗ	ΕΡΓΟ DWD	Παρουσα αξια
0	- 2.758.684,53 €	- 2.758.684,53 €
1	2.075.589,04 €	1.853.204,50 €
2	2.075.589,04 €	1.654.646,88 €
3	2.075.589,04 €	1.477.363,28 €
4	2.075.589,04 €	1.319.074,36 €
5	2.075.589,04 €	1.177.744,96 €
6	2.075.589,04 €	1.051.558,00 €
7	2.075.589,04 €	938.891,07 €
8	2.075.589,04 €	838.295,60 €
9	2.075.589,04 €	748.478,22 €
10	2.075.589,04 €	668.284,12 €
Συνολο Π.Α.		11.727.541,00 €
Κ.Π.Α		8.968.856,47 €
Ε.Σ.Α		75%

B.3.6.1. Σύγκριση έργων BFR και DWD

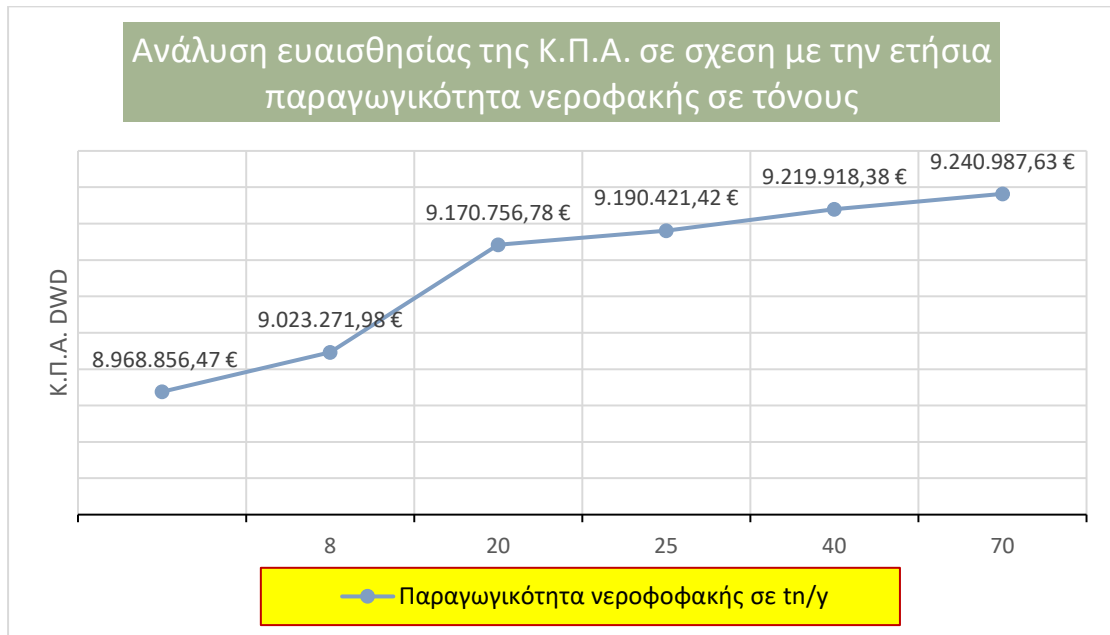
Από τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων, προκύπτει ότι ΚΠΑ (DWD) > ΚΠΑ (BFR) και ΕΣΑ (DWD) > ΕΣΑ (BFR) για τιμή $k = 12\%$. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αντικατάσταση του βιοφίλτρου με υδατοδεξαμενή νεροφακής και η χορήγηση της ως μέρος της ιχθυοτροφής είναι οικονομικά βιώσιμη.

B.3.7. Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας, αποσκοπεί στο να εξακριβώσουμε το πόσο «ευαίσθητη» είναι η ΚΠΑ του έργου DWD σε περίπτωση αλλαγής της παραγωγικότητας της νεροφακής. Αυτό διαφαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, τα δεδομένα του οποίου μας υποδεικνύουν ότι με την αύξηση της παραγωγικότητας, αυξάνεται αντίστοιχα και η ΚΠΑ του έργου. Ωστόσο, η αύξηση αυτή, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν είναι γραμμική, κι αυτό διότι η παραγωγή καθορίζεται και από άλλες παραμέτρους.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφικών δεδομένων που να αφορούν την οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος RAS, το οποίο να κάνει χρήση νεροφακής ως βιοφίλτρο και ως μέρος της τροφής για τα ψάρια. Οι περισσότερες έρευνες έχουν να κάνουν με την καταλληλότητα της νεροφακής από βιοχημική άποψη.

Διάγραμμα 8. Ανάλυση ευαισθησίας της Κ.Π.Α. DWD σε σχέση με την ετήσια παραγωγικότητα νεροφακής σε τόνους



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα και προτάσεις

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εκπόνηση οικονομοτεχνικής μελέτης σε μια υποτιθέμενη μονάδα τιλάπιας (*Oreochromis sp.*) παραγωγής 1000tn ετησίως, ώστε να εξετάσουμε τον αντίκτυπο που θα έχει στην υδατοκαλλιέργεια η αντικατάσταση του βιοφίλτρου από μονάδα καλλιέργειας νεροφακής και τη χορήγησή της ως τροφή.

Έπειτα από 11 ημέρες καλλιέργειας, στις υδατοδεξαμενές όπου εφαρμόστηκε το μεγαλύτερο ποσοστό συγκομιδής (30%), η επιφάνεια κατά το μεγαλύτερο μέρος της ήταν ακάλυπτη και μόνο λίγα φυτά νεροφακής είχαν απομείνει. Αντίθετα, οι δεξαμενές του επιπέδου συγκομιδής 10% περιείχαν ελαφρά μειωμένο ποσό βιομάζας σε σχέση με αυτό της 1ης ημέρας. Πιο συγκεκριμένα, η παραγόμενη βιομάζα ήταν 7,43 g /m² /d. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο ικανοποιητικά, καθώς η μέχρι σήμερα βιβλιογραφία αναφέρει μεγαλύτερες τιμές παραγωγικότητας. Παρόλα αυτά, αν η σύγκριση γίνει σε σχέση με την παραγόμενη από τη σόγια πρωτεΐνη, οι αποδόσεις του παρόντος πειράματος ήταν παραπάνω από διπλάσιες. Το γεγονός αυτό από μόνο του εξασφαλίζει και τη χορήγηση πρωτεΐνης στα ψάρια, μιας κι έτσι δεν απαιτείται επιπλέον εισαγωγή πρωτεΐνης, αφού τα ψάρια καλύπτονται διατροφικά από αυτή της νεροφακής. Επίσης, η ανάπτυξη της νεροφακής στηρίζεται στα απόβλητα της ίδιας της υδατοδεξαμενής, κάτι που ενισχύει περαιτέρω την αυτάρκεια και την οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας RAS, καθώς μειώνονται οι τοξικοί παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ευζωία των ιχθύων και παράλληλα επιβαρύνουν το περιβάλλον, όσο και την βιωσιμότητα σε οικονομικό επίπεδο, η οποία επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του βιοφίλτρου στη μονάδα του συστήματος RAS. Η τελευταία αποδείχτηκε από τη σύγκριση των έργων BFR (βιοφίλτρο) και DWD (νεροφακή). Από τη σχετική οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε ότι ΚΠΑ (DWD) > ΚΠΑ (BFR) : 8.968.856,47 € > 6.050.007,46 €, και ΕΣΑ (DWD) > ΕΣΑ (BFR) 75% > 49%. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αντικατάσταση του βιοφίλτρου με υδατοδεξαμενή νεροφακής και η χορήγηση της ως μέρος της ιχθυοτροφής είναι οικονομικά βιώσιμη. Μία ακόμη

παρατήρηση είναι ότι υπήρχε επαρκής ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο μέσο ανάπτυξης και αυτό αποδίδεται στον φυσικό αερισμό που λαμβάνει χώρα παρουσία της νεροφακής. Αυτό αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα, καθώς στην περίπτωση που χρησιμοποιούνταν βιοφίλτρο, θα ήταν υποχρεωτική η έγχυση επιπλέον οξυγόνου στο μέσο ανάπτυξης ώστε να αναπληρώσει την απώλεια του καταναλισκόμενου από τα ψάρια και αυτού που χάνεται λόγω της δράσης των μικροβίων που αναπτύσσονται στο βιοφίλτρο. Έτσι, μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ρεύματος που απαιτείται για την εισαγωγή του οξυγόνου.

Ωστόσο, απαιτείται επιπλέον πειραματισμός, ειδικά εν προκειμένω στη χώρα μας, ώστε να προκύψουν τα μέγιστα δυνατά οφέλη από την εφαρμογή της νέας αυτής τεχνολογίας στο πεδίο των υδατοκαλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, βασιζόμενοι στις μετρήσεις αλλά και στις δυσκολίες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος, θα μπορούσαν να γίνουν κάποιες συστάσεις πάνω σε ορισμένα σημεία-κλειδιά, όπως η ετήσια παραγωγή να είναι κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, η διενέργεια ενός καλύτερου αερισμού του μέσου ανάπτυξης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η χρησιμοποίηση κάποιου ρυθμιστικού διαλύματος (buffer) για τη διατήρηση του pH σε χαμηλότερες τιμές και ίσως παράλληλα μια διαφορετική μεταχείριση για την απομάκρυνση της πλεονάζουσας ποσότητας των νιτρικών ιόντων αλλά και οργανισμών ανταγωνιστικών προς τη νεροφακή (π.χ άλγη). Επίσης, με περαιτέρω πειραματισμό μπορεί να γίνει επιλογή του βέλτιστου χρόνου υδραυλικής παραμονής (HRT) και του επιπέδου (ποσότητας) συγκομιδής. Φυσικά, οποιαδήποτε ενέργεια πραγματοποιηθεί, πρέπει να γίνεται πάντα λαμβάνοντας υπόψη το οικονομικό κόστος, ώστε η διαχείριση της μονάδας να είναι πάντα οικονομικά βιώσιμη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Αραβώσης Κ., Καρμπέρης Α. & Σωτήρχος Α. (2011). Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση επενδύσεων, Εκδότης: Νομική βιβλιοθήκη.

Βασιλείου Δ. & Ηρειώτης Ν. (2019). Χρηματοοικονομική διοίκηση, θεωρία και πρακτική, 2^η έκδοση. Εκδόσεις ROSILI

Κλαουδάτος Δ. Σπυρίδων, Κλαουδάτος Σ. Δημήτριος (2010). Κατασκευές υδατοκαλλιεργητικών συστημάτων. Θαλάσσιες-Λιμνοθαλάσσιες-Χερσαίες, Απρίλιος 2010, σελ. 18-19 και 33-34.

Χατζηευσταθίου, Μ. Χ. (2011). Εκτίμηση της Συμβολής των Θαλάσσιων Υδατοκαλλιεργειών στη Βιώσιμη Ανάπτυξη του Νησιωτικού Χώρου. Μυτιλήνη.

Ξένη

Abdel-Fattah El-Sayed (2019). Tilapia Culture, 2nd edition, Academic press

Ansal, M., A. Dhawan, & V. Kaur (2010). Duckweed based bio-remediation of village ponds: An ecologically and economically viable integrated approach for rural development through aquaculture. Livestock Research for Rural Development.

APHA (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC.

Appenroth, K.J., et al. (2017). Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food. Food Chemistry, p. 266-273.

Appenroth, K.J., et al. (2018). Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus *Wolffia* (*Lemnaceae*) as Human Food. Frontiers in Chemistry, 6 (483).

Appenroth, K.J., Borisjuk, N. & Eric, L. (2013). Telling Duckweed Apart: Genotyping Technologies for the *Lemnaceae*. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 19: p. 1-10.

Baur, R. J. & Buck, D. H. (1980). Utilization of duckweed in the culture of grass carp, tilapia and freshwater prawns. Unpublished paper, Illinois Natural History Survey RR I, Kinmundy, Illinois.

Behera, B.K., Rout, P.K., & Behera, S. (2019). In book: Move Towards Zero Hunger. Springer.

Bhanthumnavin, K. & McCarry (1971). M. Wolffia arrhiza as a Possible Source of Inexpensive Protein. Nature 232, 495.

Bornali, K. (2004). Effect of duckweed (*Lemna minor*) as supplementary feed on monoculture of tilapia (*Oreochromis niloticus*). MS thesis. Mymensingh: Bangladesh Agricultural University, 2004, 104.

Bregnballe, J. (2015). A guide to recirculation aquaculture An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. FAO, 2015 edition

Caicedo, J. R., Steen, N. P., Arce, O. & Gijzen, H. J. (2000) Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrhiza*). Journal article : Water Research (Oxford) 2000 Vol.34 No.15 pp.3829-3835 ref.25

Calicioglu Ozgul, Mert Y. Sengul, Pandara Valappil Femeena & Rachel A. Brennan (2021) Duckweed growth model for large-scale applications: Optimizing harvesting regime and intrinsic growth rate via machine learning to maximize biomass yields. Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, ScienceDirect.

Cassani, J.R. & Caton, W.E. (1983). Feeding behaviour of yearling and older hybrid grass carp. Journal of Fish Biology, 22: 35-41.

Cassani, J.R. (1981). Feeding behaviour of underyearling hybrids of the grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (female) and the bighead carp, *Hypophthalmichthys nobilis* (male), on selected species of aquatic plants. Journal of Fish Biology, 18: 127-133.

Cedergreen, N. & Madsen, T-V. (2002) Nitrogen uptake by the floating macrophyte *Lemna minor*, Department of Plant Ecology, University of Aarhus, Denmark. Published in *New Phytologist*

Chakrabarti R., William D., Clark, Jai Gopal Sharma, Ravi Kumar Goswami, Avanish Kumar Shrivastav & Douglas R. Tocher. (2018) Mass Production of *Lemna minor* and Its Amino Acid and Fatty Acid Profiles. *Front Chem.* 2018; 6: 479.

Chapman, D (1992). *Water Quality Assessments*. Chapman and Hall, London.

Chara J, Pedraza G, Conde N (1999). The productive water decontamination system: A tool for protecting water resources in the tropics. *Livest. Res. Rural Dev.*

Chaturvedi KMM, Langote MDS & Asolekar RS (2003). Duckweed-fed fisheries for treatment of low strength community waste water. *WWW TM Newsletter- Asian Institute of Technology, India.*

Cheng, JJ & Stomp, AM (2009). Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 37 (1), 17-26.

Clark, PB & PF Hillman (1996). Enhancement of Anaerobic Digestion Using Duckweed (*Lemna minor*) Enriched with Iron. *Water and Environment Journal*, 10 (2).

Costa-Pierce, B.A. and G.G. Page (2010) in press. Sustainability science in aquaculture. In: Costa-Pierce, B.A. (ed.), *Ocean Farming and Sustainable Aquaculture Science and Technology*. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer Science, N.Y.

Crawford Daniel J., Elias Landolt, Donald H. Les, Jenny K. Archibald, Rebecca T. Kimball (2005). Allozyme variation within and divergence between *Lemna gibba* and *Lemna disperma*: Systematic and biogeographic implications. *Aquatic Botany* 83, 119-128.

Cui, W. & Cheng, J.J. (2015). Growing duckweed for biofuel production: a review. *Plant Biol (Stuttg)*, 17 Suppl 1: p. 16-23.

Culley, D.D., Gholson, J.H., Chisholm, T.S., Standifer, L.C. & Epps, E.A. (1978). Water quality renovation of animal waste lagoons utilizing aquatic plants. EPA Publication No. 600/2-78-153. Ada, Oklahoma, US Environmental Protection Agency. p. 153.

Culley, D.D., Réjmenková, E., Kvet, J. & Frye, J.B. (1981). Production, chemical quality and use of duckweeds (*Lemnaceae*) in aquaculture, waste management, and animal feeds. *Journal of the World Mariculture Society*, 12 (2): 27-49.

Culver Keith, D.C. (2008). *Aquaculture, Innovation and Social Transformation* (Vol. 17) Springer.

Dang Thi My Tu, Nguyen Thi Kim Dong & T R Preston (2012). Effect on growth, apparent digestibility coefficients and carcass quality of local Muscovy ducks of feeding high or low protein duckweed (*Lemna minor*) as replacement for soybean meal in a rice bran basal diet. *Livestock Research for Rural Development* 24 (4).

Daud, M.K., et al. (2018). Potential of Duckweed for the Phytoremediation of Landfill Leachate. *Journal of Chemistry*, 2018.

Dauda Akeem Babatunde, A. F. (2019). Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, p. 81-88.

Devlamynck R, Fernandes de Souza M., Bog M., Leenknecht J, Eeckhout M. & Meers E. (2020). Effect of the growth medium composition on nitrate accumulation in the novel protein crop *Lemna minor*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 206 (2020), Science Direct

De Beukelaar, M. (2017). The effect of positive information and meal-fit on the acceptability of duckweed as human food, in the Netherlands.

Duthu, G.S. & Kilgen, R.H. (1975). Aquarium studies on the selectivity of 16 aquatic plants as food by fingerling hybrids of the cross between *Ctenopharyngodon idella* and *Cyprinus carpio*. *Journal of Fish Biology*, 7: 203-208.

EAT-Lancet Commission on Healthy Diets From Sustainable Food Systems, p. 15. The entire Commission can be found online at thelancet.com/commissions/EAT.

Ebeling, J. & Timmons M. (2012). In book: *Aquaculture Production Systems*, First Edition. Edited by James Tidwell. Wiley publications.

Edwards, D.J. (1974). Weed preference and growth of young grass carp in New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 8: 341-350.

Edwards, P., C. Polprasert, & K. L. Wee (1987). Resource recovery and health aspects of sanitation. AIT Research Report No. 205. pp. 324.

Edwards, P., M. S. Hassan, C. H. Chao, & C. Pacharaprakiti (1992). Cultivation of duckweeds in septage loaded earthen ponds. *Bioresource Technol.* 40: 109-117.

Ekperusi, A.O., F.D. Sikoki, & E.O. Nwachukwu (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*, 223: p. 285-309.

El-Shafai, S., et al. (2004). Suitability of using duckweed as feed and treated sewage as water source in tilapia aquaculture.

El-Shafai, S.A., et al. (2004). Apparent digestibility coefficient of duckweed (*Lemna minor*), fresh and dry for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture Research*. 35(6): p. 574-586.

Escobar, C. & A.C. Escobar (2017). Duckweed: A Tiny Aquatic Plant with Enormous Potential for Bioregenerative Life Support Systems.

EWRA (2004). Water resources management: risks and challenges for the 21st century (Vol. 1) EWRA.

Faisal I. & Hai R. B. (2018). Sustainable Aquaculture. (Chettiyappan Visvanathan, Ed.) SPRINGER.

Fakhoorian, T (2015). Interview on duckweed processing and collection, September 24.

FAO (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, London.

FAO (2013). Indicators for sustainable aquaculture in mediterranean and black sea countries, Rome.

FAO (2014). Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture. Food and Agriculture organization, Rome, Italy.

FAO (2020). The state of world fisheries and aquaculture. p. 21, 65, 165.

Fasakin, E.A., Balogun, A.M. & Fasuru, B.E. (1999). Use of duckweed, *Spirodela polyrrhiza*, L. Schleiden, as a protein feedstuff in practical diets for tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquaculture Research*, 30: 313-318.

Ferdoushi, Z., Haque, F., Khan, S. & Haque, M. (2008). The Effects of two Aquatic Floating Macrophytes (*Lemna* & *Azolla*) as Biofilters of Nitrogen and Phosphate in Fish Ponds. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 8: 253-258.

Fezzardi D., Massa F., Àvila-Zaragoza P., Rad F., Yücel-Gier G., Deniz H., Hadj Ali Salem M., Hamza H.A., Ben Salem S. (2013). FAO Indicators for sustainable aquaculture in Mediterranean and Black Sea countries. Guide for the use of indicators to monitor sustainable development of aquaculture. Studies and Reviews. General Fisheries Commission for the Mediterranean. p. 12. No 93. Rome.

Fischer, Z. (1968). Food selection in grass carp *Ctenopharyngodon idella* under experimental conditions. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 15: 1-8.

Fischer, Z. (1970). The elements of energy balance in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Part I. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 17: 421-434.

Flores Miranda, M.D.C., et al. (2014). Effects of diets with fermented duckweed (*Lemna sp.*) on growth performance and gene expression in the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture International*, 23.

Forni, C. & Tommasi, F. (2015). Duckweed: A Tool for Ecotoxicology and a Candidate for Phytoremediation. *Current Biotechnology*, 04: p. 1-1.

Frankic Anamarija, C. H. (2003). Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture. *Aquaculture International*, p. 517-530.

Frick, H. (1985). Micronutrient tolerance and accumulation in the duckweed, *Lemna*. *Journal of Plant Nutrition*, 8(12): p. 1131-1145.

Gaigher, I. G., Porath, D. & Granoth, G. (1984). Evaluation of duckweed (*Lemna gibba*) as feed for tilapia (*Oreochromis niloticus* cross *Oreochromis aureus*) in a recirculating unit. *Aquaculture*, 41 (3): 235-244.

- Gaigher, I.G. & Short, R. (1986). An evaluation of duckweed (*Lemnaceae*) as a candidate for aquaculture in South Africa. pp. 81-90. In R.D. Wamsley and J.G. Wan, eds. Canberra, CSIRO, Aquaculture 1980 Report Series No. 15.
- Galkina, N.V. Abdullaev, D.A. & Zacharova, V.L. (1965). Biological and feed features of duckweeds. Uzbekistan Biological Journal, 3: 44-47.
- Ghobrial, M. (2000). Impact of urea fertilizer on growth and biochemical composition of some aquatic plants. Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries, 4: p. 125-138.
- Gijzen H.J. & Ikramullah M. (1999). Pre-Feasibility of Duckweed-Based Wastewater Treatment and Resource Recovery in Bangladesh World Bank Report, p. 185.
- Gijzen, H.J., & M. Khondker (1997). An Overview Physiology, Cultivation and Applications of Duckweed. Report. Annex I. Literature Review. Dhaka: Duckweed (DWRP).
- Goetz, H. (2012). The Effects of Baking on the Action of Trypsin inhibitor. M.Sc thesis. The Ohio State University 2012, 1-12.
- Goopy, J.P. & P.J. Murray (2003). A Review on the Role of Duckweed in Nutrient Reclamation and as a Source of Animal Feed. Asian-Australas J Anim Sci, 2003. 16(2): p. 297-305.
- Guha, R. (1997). Duckweeds. Envis Newsletter, March 1997: 5-9. Bangalore, Indian Institute of Science.
- Gupta, C. & D. Prakash (2013). Duckweed: an effective tool for phyto-remediation. Toxicological & Environmental Chemistry, 95(8): p. 1256-1266.
- Hajra, A. & Tripathi, S.D. (1985). Nutritive value of aquatic weed, *Spirodela polyrrhiza* in grass carp. Indian Journal of Animal Science, 55: 702-705.
- Hall SJ, Delaporte A, Phillips MJ, Beveridge M, O'Keefe M (2011). Blue frontiers: managing the environmental costs of aquaculture. p. 80. The WorldFish Center, Malaysia.
- Haque MS (2005). Use of duckweed (*Lemna minor*) as supplementary feed in monoculture of sharpunti (*Puntius gonionotus*). MS thesis. Mymensingh: Bangladesh Agricultural University. 2005, 94.

Hasan Md. Mahmudul, M. H. (2018). Evaluation of duckweed based waste stabilization pond system for domestic wastewater treatment. 4th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2018).

Hassan, M. S. & Edwards, P. (1992). Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla* and *Spirodela polyrhiza*) as feed for Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 104: 315-326.

Hassan, K., Rahman, & S. Sultana (2019). Effect of use of duckweed powder as a fish feed on monoculture of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *International Journal of Agricultural Research*, 2019, 9: p. 73-83.

Hassan, M. & R. Chakrabarti (2009). Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture: a review.

Hillman William S. (1961). *The Botanical Review* volume 27, pages 221–287 *The Lemnaceae, or duckweeds. A review of the descriptive and experimental literature.*

Hillman, W. S., & Culley, D. D. (1978). The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming. *American Scientist*, 66 (4), 442-451.

Huber, G. W., Iborra, S., & Corma, A. (2006). Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical Reviews*, 106(9), 4044-4098.

IAEG-SDGs (2018). October 15, Tier Classification for Global SDG Indicators. p. 33.

Iqbal, S. (1999). *Duckweed Aquaculture Potentials, Possibilities and Limitations for Combined Wastewater Treatment and Animal Feed Production in Developing Countries.*

Jana B. B, Mandal R. N. & Jayasankar P. (2018). *Wastewater Management Through Aquaculture*, p. 125. Springer.

Jayasankar, B. B. (2018). *Wastewater Management Through Aquaculture*. Springer.

Journey, W., Skillicorn, P., & Spira, W. (1994). *Duckweed Aquaculture*. Washington D.C.: World Bank.

Karakassis, M. H. (2008). *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer.

Khvatkov, P., Chernobrovkina, M., Okuneva, A. & Dolgov, S. (2019) Creation of culture media for efficient duckweeds micropropagation (*Wolffia arrhiza* and *Lemna minor*) using artificial mathematical optimization models. Journal article : Plant Cell, Tissue and Organ Culture 2019 Vol.136 No.1 pp.85-100 ref.57

Koles, S., R. Petrell, & L. Bagnall (1987). Duckweed culture for reduction of ammonia, phosphorus and suspended solids from algal-rich water.

Körner, S., Das, K.S., Veenstra, S. & Vermaat, J. (2001) The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. Volume 71, Issue 1, September 2001, Pages 71-78. Aquatic Botany

Kostecka, J., & Kaniuczak, J. (2008). Vermicomposting of duckweed [*Lemna minor* L.] biomass by *Eisenia fetida* [Sav.] earthworm. Journal of Elementology, 13(4), 571-579.

Krishnan, S.B. & J.E: Smith. (1987). Public health issues of aquatic systems used for wastewater treatment. In: Aquatic plants for water treatment and resource recovery. Eds: Reddy K.R: & W.H. Smith. Magnolia, Orlando, FL. pp. 855-878.

Kutschera, U. & K. Niklas (2014). Darwin-Wallace Demons: Survival of the fastest in populations of duckweeds and the evolutionary history of an enigmatic group of angiosperms. Plant Biology.

Kutschera, U. & W.R. Briggs (2013). Seedling development in buckwheat and the discovery of the photomorphogenic shade-avoidance response. Plant Biol (Stuttg), 2013. 15 (6): p. 931-40.

Landolt E & Kandeler R (1987). Biosystematic investigations on the family of duckweeds (*Lemnaceae*) published in the "Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes ETH, Stiftung Rübél, Zürich".

Landolt, D. H., R. Crawford & T. Kimball (2006). Speciation in duckweeds (*Lemnaceae*): phylogenetic and ecological inferences. Aliso. 22: 231-242.

Landolt, E. (1986). The family of *Lemnaceae* - a monographic study: morphology, karyology, ecology, geographic distribution, systematic position, nomenclature, descriptions, Vol. 2. Zurich, Veröffentlichungen des Geobotanisches Institut der Edg. Tech. Hochschule, Stiftung Ruebel. p. 566.

Lasfar, S., et al. (2007). Intrinsic growth rate: A new approach to evaluate the effects of temperature, photoperiod and phosphorus-nitrogen concentrations on duckweed growth under controlled eutrophication. *Water Research*, 2007. 41 (11): p. 2333-2340.

Leng, R. A. (1999). *Duckweed: A tiny aquatic plant with enormous potential for agriculture and environment*. Rome: FAO.

Leng, R. A., Stambolie, J. H., & Bell, R. (1995). Duckweed-a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*, 7 (1), 36.

Leng, RA, JH Stambolie, & RE Bell. (1995). Duckweed-A Potential High Protein Feed Resource for Domestic Animals and Fish. *Livestock Research for Rural Development* 7 (1): 1-11.

Lewandowski, I. (2018). *Bioeconomy*. (I. Lewandowski, Ed.) Hohenheim, Stuttgart, Germany: Springer.

Lowry, OH, Rosebrough, NJ, Farr, AL & Randall, RJ (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 193, 265-275.

Markou, G., et al. (2018). Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: Contamination risks and biomass safety concerns. *Biotechnology Advances*, 2018. p. 36.

Missimer, R. M. (2012). *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Springer.

Mohedano, R., Costa H. R., Tavares, F. & Filho, P. B. (2012) High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds *Bioresour Technol*. 2012 May;112:98-104. doi: 10.1016/j.biortech.2012.02.083. Epub 2012 Feb 24.

Muradov, N., et al. (2014). Dual application of duckweed and azolla plants for wastewater treatment and renewable fuels and petrochemicals production. *Biotechnol Biofuels*, 2014. 7(1): p. 30.

Muzaffarov, A. M., T. T. Taubaev, & M. Abdiev (1968). Use of lesser duckweed in poultry feeding. (In Russian). *Uzb. Biol. Zh.* 12: 44-46.

Mwale, M. & R. Francisca (2013). Characteristics of duckweed and its potential as feed source for chickens reared for meat production: a review. *Sci Res Essays*, 2013. 8: p. 689-697.

Naskar K., Banarjee, A.C., Chakraborty, N.M., Ghosh, A. (1986). Yield of *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimmer from cement cisterns with different sewage concentrations, and its efficacy as a carp feed. *Aquaculture* 51: 211-216.

Nieuwenhuis, R., Maring, L. (2009). Naar nieuwe ketens voor het benutten van eendenkroos. Deltares. Rapportnr. 09.2.205, Utrecht.

Nikolskij, G.V. & Verigin, B.V. (1966). The basic biological characteristics of white amur and bighead and their acclimatization in the water reservoirs of our country. pp. 30-40. In *Herbivorous Fish*. Moscow, Piscevaja Promyslennost.

NRC (2011). (National Research Council) Nutrient requirements of fish. Committee on Animal Nutrition Board on Agriculture. National Academy Press, Washington D. C, USA. p. 114.

Omitoyin, B. O. (2017). Biological Treatments of Fish Farm Effluent and its Reuse in the Culture of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Aquaculture Research & Development*.

Opuszynski, K. (1972). Use of phytophagous fish to control aquatic plants. *Aquaculture*, 1: 61-79.

Ozengin, N. & A. Elmaci (2007). Performance of Duckweed (*Lemna minor*) on different types of wastewater treatment. *Journal of environmental biology / Academy of Environmental Biology, India*, 28: p. 307-14.

Paolacci Simona, Vlastimil Stejskal & Marcel AK Jansen (2019). Programm AquaSus, Sustainable Aquaculture, Circular Economy, Plant Protein, University College Cork.

Paolacci Simona, Vlastimil Stejskal & Marcel AK Jansen (2020). Programm AquaSus, Sustainable Aquaculture, Circular Economy, Plant Protein, University College Cork

Patel D.K., & Kanungo V.K. (2010) Phytoremediation potential of duckweed (*lemna minor*: a tiny aquatic plant) in the removal of pollutants from domestic wastewater with special reference to nutrients. *The Bioscan, An International Quarterly Journal of Life Sciences* 5(3) : 355-358, 2010.

Paterson, J.B., M.A. Camargo-Valero & A. Baker (2020). Uncoupling growth from phosphorus uptake in *Lemna*: Implications for use of duckweed in wastewater remediation and P recovery in temperate climates. *Food and Energy Security* 9 (4).

Peters, M., Timmerhaus, Klaus, West, Ronald E (2018). Σχεδιασμός και οικονομική μελέτη εγκαταστάσεων για μηχανικούς, Βιβλίο, Εκδόσεις Τζιόλας.

Petersen, F., Demann, J., Restemeyer, D., Ulbrich, A., Olf, H-W., Westendarp, H. & Appenroth, K-J. (2021). Influence of the Nitrate-N to Ammonium-N Ratio on Relative Growth Rate and Crude Protein Content in the Duckweeds *Lemna minor* and *Wolffiella hyaline*. *Plants (Basel)* 2021 Aug 23; 10(8):1741. doi: 10.3390/plants10081741.

Porath D, Helphor B & Koton A (1979). Duckweed as an aquatic crop: Evaluation of clones for aquaculture. *Aquat Bot.* 1979; 7:273-278.

Porath, D & Koton, A (1977). Enhancement of protein production in fish ponds with duckweed (*Lemnaceae*). *Israeli Journal of Botany*, 26: 51.

Rejmankova, E (1979) Function of duckweed in fishpond ecosystems. Ph.D. Dissertation, Institute of Botany. Czechoslovak Academy of Science, Praha, Czechoslovakia. 166p. (In Czech).

Rifai, S.A. (1979). The use of aquatic plants as feed for *Tilapia nilotica* in floating cages. pp. 61-64. In Proceedings of the SEAFDEC/IDRC International Workshop on Pen and Cage Culture of Fish, 11-22 February 1979, Tigbauan, Iloilo, Philippines. Iloilo, SEAFDEC.

Robarge, WP, Edwards, A & Johnson, B (1983). Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 14, 1207-1215.

Ruigrok, T. (2015). Temperature response of duckweed growth at the Ecoferm greenhouse.

Rusoff, L. L., E. W. Blakeney, & D. D. Culley (1980). Duckweeds (*Lemnaceae* family) - A potential source of protein and amino acids. *J. Agric. Food Chem.* 28: 848-850.

Sanders r. Nada, J. D. (2018). Βασικές Αρχές της Βιώσιμης Επιχείρησης-Θεωρία, Πράξη και Στρατηγική (Α. Γκοταμάνη, Επιμέλεια, & Μ. Γιάννη, Μετάφραση). Broken Hill.

- Sandorf, B. B. (2020). Potential for Sustainable Aquaculture: Insights from Discrete Choice Experiments. *Environmental and Resource Economics*, p. 401-421.
- Sanni, A. & Fakunle (2009). Effect of partial replacement of fishmeal with duckweed (*Lemna pauciscostata*) meal on the growth performance of *Heterobranchus longifilis* fingerlings.
- Sharma K. & Sanjay, R. S. (2013). *Wastewater Reuse and Management*. Springer.
- Shireman, J.V., Colle, D.E. & Rottmann, R.W. (1977). Intensive culture of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* in circular tanks. *Journal of Fish Biology*, 11.
- Shireman, J.V., Colle, D.E. & Rottmann, R.W. (1978). Growth of grass carp fed natural and prepared diets under intensive culture. *Journal of Fish Biology*, 12.
- Skillicorn, P., W. Spira, & W. Journey (1993). *Duckweed Aquaculture: A New Aquatic Farming System for Developing Countries*.
- Sońta, M., A. Rekiel, & M. Batorska (2019). Use of Duckweed (*Lemna*) in Sustainable Livestock Production and Aquaculture - A Review. *Annals of Animal Science*, 2019. 19 (2): p. 257-271.
- Sree, K.S., M. Bog & K.J. Appenroth (2016). Taxonomy of duckweeds (*Lemnaceae*), potential new crop plants. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2016. 28: p. 1.
- Stephenson, M.G., Turner, P.P., Colt, J., Knight, A., Tchobanoglous, G. (1980). *The Use and Potential of Aquatic Species for Wastewater Treatment*. Publication No. 65, California State Water Resources Control Board.
- Suzuki, W., Sugawara, M., Miwa, K., & Morikawa, M. (2014). Plant growth-promoting bacterium *Acinetobacter calcoaceticus* P23 increases the chlorophyll content of the monocot *Lemna minor* 58 (duckweed) and the dicot *Lactuca sativa* (lettuce). *Journal of bioscience and bioengineering*, 118 (1), p. 41-44.
- Talukdar, M. & M. Rahman (2012). Suitability of Duckweed (*Lemna minor*) as Feed for Fish in Polyculture System. *Int. J. Agril. Res. Innov. & Tech*.

Tao X, Yang F, Yao X, Yan-ling J, Xin-rong M, Yun Z et al. (2013). Comparative transcriptome analysis to investigate the high starch accumulation of duckweed (*Landoltia punctata*) under nutrient starvation. *Biotechnol Biofuels*. 2013; 6: p. 1-15.

Tavares, F. (2008). Dried duckweed and commercial feed promote adequate growth, performance of tilapia fingerlings. *Biotemas*.

Tavares, F., et al. (2008). Dried duckweed and commercial feed promote adequate growth performance of tilapia fingerlings. *Biotemas*.

Tekin, K., Karagöz, S., & Bektaş, S. (2014). A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 673-687.

Timmons M., Guerdat T., & Vinci B. (2018). In book: *Recirculating Aquaculture*, 4th edition, USDA, NRAC Publication, No 401.

Timmerman, M. & I.E. Hoving (2016). Purifying manure effluents with duckweed. Wageningen, Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, Livestock Research Report 942.

Truax, R., D. D. Culley, M. Griffith, W. Johnson, & J. Wood (1972). Duckweed For Chick Feed? *Louisiana Agriculture* 16 (1): 8-9.

Turcios Ariel E. (2014). Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents-What Can We Learn from the Past for the Future? *mdpi*, p. 836-856.

United Nations (2015). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. A/RES/70/1. United Nations, New York.

Van der Spiegel, M., M.Y. Noordam, & H.J. van der Fels-Klerx (2013). Safety of Novel Protein Sources (Insects, Microalgae, Seaweed, Duckweed, and Rapeseed) and Legislative Aspects for Their Application in Food and Feed Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2013. 12 (6): p. 662-678.

Velichkova, K.N., & Sirakov, I.N. (2013). The Usage of Aquatic Floating Macrophytes (*Lemna* And *Wolffia*) as Biofilter in Recirculation Aquaculture System (RAS) *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 13: 101-110.

Verma, R., & Suthar, S. (2015). Utility of Duckweeds as Source of Biomass Energy: a Review. *BioEnergy Research*. 1-9.

Wagner, C. & Valenti, J. M. (2018). Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*.

Walsh, E., Kuehnhold, H., O'Brien, S., Coughlan, E. & Jansen, M. (2021). Light intensity alters the phytoremediation potential of *Lemna minor* *Environmental Science and Pollution Research* (2021) 28:16394-16407.

Walsh, E., Coughlan, N., O'Brien, S., Jansen, M. & Kuehnhold, H. (2021) Density Dependence Influences the Efficacy of Wastewater Remediation by *Lemna minor* Plants (Basel). 2021 Jul 3;10(7):1366. doi: 10.3390/plants10071366.

Wang, W., Li, R., Zhu, Q., Tang, X. & Zhao, Q. (2016) Transcriptomic and physiological analysis of common duckweed *Lemna minor* responses to NH_4^+ toxicity. *BMC Plant Biol*. 2016 Apr 18;16:92. doi: 10.1186/s12870-016-0774-8.

Wigginton, A. (2005). Some effects of cadmium on select crayfish in the family *Cambaridae*.

Willett Walter, P. J. (2019). Food planet health. Summary Report of the EAT-Lancet Commission.

Xu, J., Zhao, H., Stomp, A., & Cheng, J. J. (2012). The production of duckweed as a source of biofuels. *Biofuels*, 3 (5), 589-601.

Zhang, K., Chen, Y.-P., Zhang, T., Zhao, Y., Shen, Y., Huang, L., Gao, X. & Guo, J.-S. (2014). The logistic growth of duckweed (*Lemna minor*) and kinetics of ammonium uptake. *Environmental Technology*, 35:5, 562-567, DOI: 10.1080/09593330.2013.837937

Zhao, H., et al. (2012). Duckweed rising at Chengdu: summary of the 1st International Conference on Duckweed Application and Research. *Plant Mol Biol*. 78 (6): p. 627-32.

Zhao, Z., Shi, H., Liu, Y., Zhao, H., Su, H., Wang, M. & Zhao, Y. (2014) The influence of duckweed species diversity on biomass productivity and nutrient removal efficiency in swine wastewater. *Bioresource Technology* 167 (2014) 383-389.

Ziegler, P., et al. (2015). Relative in vitro growth rates of duckweeds (*Lemnaceae*) - the most rapidly growing higher plants. *Plant Biol* (Stuttg), 2015.

Διαδικτυακοί τόποι

aade.gr , Εκτιμήσεις Ακινήτων

alibaba.com/product-detail/Machine-Fruit-Fruit-Drying-Machine-Dehydrator_60464889347.html?s=p

gov.gr/ipiresies/epikheirematike-drasterioteta/phorologia-epikheireseon

mariovictorhashiba.medium.com/meet-duckweed-a-plant-based-source-of-b12-62079d9d44dd

meteoacharnes.gr/statistika/datasummary

sdgs.un.org/goals/goal , United Nations (2017)

ypergasias.gov.gr/ergasiakes-scheseis/syllogikes-ergasiakes-sxeseis/katotatos-misthos/