

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Περιβαλλοντικό αποτύπωμα ολοκληρωμένων πολυτροφικών
συστημάτων υδατοκαλλιέργειας**

Άγγελος Αστέριος Πάσχου

Βόλος 2025

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Νεοφύτου Νικόλαος, Καθηγητής, Υδατοκαλλιέργειες και Περιβάλλον, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Επιβλέπων***,

Παναγιωτάκη Παναγιώτα, Καθηγήτρια, Υδατοκαλλιέργειες, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***,

Κλαουδάτος Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Αλιεία, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***.

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία σε όλους όσοι αγωνίζονται με πάθος για την προώθηση βιώσιμων πρακτικών στην υδατοκαλλιέργεια συνδυάζοντας την επιστήμη, την καινοτομία αλλά και τον σεβασμό προς το περιβάλλον. Επίσης, αφιερώνω αυτό το έργο στους μέντορες και συναδέλφους μου, που με παρότρυναν να εξερευνήσω τις δυνατότητες και τα οφέλη των ολοκληρωμένων πολυτροφικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας (IMTAs), μιας προσέγγισης που υπόσχεται μια πιο ισορροπημένη και βιώσιμη διαχείριση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Τέλος, ευελπιστώ ότι αυτή η διατριβή θα προκαλέσει προβληματισμούς και θα συντελέσει, έστω και λίγο, στην ευαισθητοποίηση για τη σημασία της συνεργασίας της φύσης και της ανθρώπινης παρέμβασης για έναν πιο υγιή πλανήτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Νεοφύτου, ο οποίος με βοήθησε στην επιλογή του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια κα Παναγιώτα Παναγιωτάκη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δημήτριο Κλαουδάτο για τις πολύτιμες παρατηρήσεις και επισημάνσεις τους. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευαισθησίες μου προς τους συναδέλφους και τους φίλους μου που μοιράστηκαν τις απόψεις, τις ιδέες και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας. Η πολύτιμη συνεισφορά και οι διαφορετικές απόψεις συνέβαλαν στην εμπλουτισμένη ανάλυση του θέματος.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και τους αγαπημένους μου που με στήριζαν και με ενέπνευσαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Η αμέριστη αγάπη, η κατανόηση και η υποστήριξή τους, μου έδωσαν τη δύναμη και την εμπιστοσύνη να προχωρήσω, παρά τις προκλήσεις και τα εμπόδια που αντιμετώπισα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή διερευνά τα ολοκληρωμένα πολυτροφικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας (IMTAs), μια καινοτόμο προσέγγιση που συνδυάζει την εκτροφή ειδών από διαφορετικά τροφικά επίπεδα, δημιουργώντας ένα αειφόρο σύστημα που ελαχιστοποιεί τα περιβαλλοντικά απόβλητα και ενισχύει την παραγωγικότητα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές υδατοκαλλιέργειες, όπου η υψηλή συγκέντρωση οργανικών και ανόργανων αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικά προβλήματα, τα συστήματα IMTA αξιοποιούν αυτά τα παραπροϊόντα ως πηγές τροφής για άλλα είδη, συμβάλλοντας στη μείωση του ευτροφισμού και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού.

Στη διατριβή παρουσιάζονται τα βασικά οικολογικά, κοινωνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα των IMTA συστημάτων. Περιγράφονται επιτυχημένα παραδείγματα εφαρμογής από χώρες όπως η Κίνα και ο Καναδάς, όπου τα IMTA έχουν συμβάλει στην αειφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων. Η Κίνα, με τη μακρά ιστορία της στην πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια, έχει αναπτύξει μεγάλης κλίμακας IMTA εγκαταστάσεις, ενώ ο Καναδάς έχει επενδύσει στην έρευνα και την τεχνολογική ανάπτυξη του τομέα, αναδεικνύοντας τη συμβολή των IMTA στη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων. Στην Ευρώπη, αν και υπάρχουν πιλοτικές προσπάθειες, τα IMTA συστήματα δεν έχουν ακόμα υιοθετηθεί σε μεγάλη κλίμακα λόγω τεχνικών, νομοθετικών και οικονομικών προκλήσεων.

Η έρευνα αναδεικνύει τις δυνατότητες των IMTA συστημάτων στη βελτίωση της βιοποικιλότητας, στην ανάπτυξη καινοτόμων πρακτικών διαχείρισης και στην ενίσχυση των τοπικών οικονομιών. Επιπλέον, εξετάζονται οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με τα συστήματα IMTA, όπως η πιθανή συσσώρευση παθογόνων ή η αλληλεπίδραση μεταξύ ειδών, και προτείνονται στρατηγικές για την αντιμετώπισή τους.

Τέλος, υπογραμμίζεται η ανάγκη περαιτέρω έρευνας, εκπαίδευσης και διαμόρφωσης πολιτικών, που θα υποστηρίξουν τη βιώσιμη υιοθέτηση των IMTA συστημάτων. Η μετάβαση προς πιο βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας, αποτελεί κρίσιμη προτεραιότητα για την παγκόσμια διατροφική ασφάλεια και τη διατήρηση των υδάτινων οικοσυστημάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΤΙΚΕΣ ΣΕΛΙΔΕΣ.....	i-iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	3
1.2 Σημασία πολυτροφικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας	4
1.3 Κριτήρια Επιλογής είδους για τα IMTAs.....	7
1.4 Χώρες δραστηριοποίησης των IMTAs.....	8
1.4.1 Κίνα	8
1.4.2 Καναδάς.....	9
1.4.3 Ευρώπη.....	11
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	14
2.1 Συμβολή εκτρεφόμενων ειδών	14
2.1.1 Ιχθυοκαλλιέργεια.....	14
2.1.2 Πολύχαιτοι.....	15
2.1.3 Ολοθούρια	16
2.1.4 Καρκινοειδή	17
2.1.5 Μύδια	18
2.1.6 Φύκη.....	19
2.1.7 Σπόγγοι.....	20
2.2 Παθογόνα	22
2.3 Αντιβιοτικά.....	23
2.4 Έλεγχος αιωρούμενων στερεών	24
2.5 Θρεπτικά συστατικά.....	25
2.6 Φυσικές επιπτώσεις	26
2.7 Οικολογικές επιπτώσεις	27
3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ IMTA	29
3.1 Πλεονεκτήματα	29
3.2 Μειονεκτήματα.....	32
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	35
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	38
ABSTRACT	46

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Το ολοκληρωμένο πολυτροφικό σύστημα υδατοκαλλιέργειας IMTAs (Integrated Multi-Trophic Aquaculture system) έχει τις ρίζες του στα αρχαία χρόνια, στα πρώτα εκτατικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας και πολυκαλλιέργειας. Το γραπτό «You Hou Bin» μεταξύ 2.200 και 2.100 π.Χ., δίνει μια περιγραφή των ψαριών και των φυτών σε εκτροφές και καλλιέργειες νερού στην Κίνα. Στην Αίγυπτο, υπήρχαν ακόμη και καταγραφές που έδειχναν την τιλάπια να εκτρέφεται σε λίμνες αποξηραμένης γεωργίας-υδατοκαλλιέργειας, σε ανάγλυφα σε τάφους που χτίστηκαν κατά την εποχή του Νέου Βασιλείου, που εμφανίστηκε περίπου το 1.550-1.070 π.Χ. (<https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/>).

Η χρήση της μεθόδου IMTAs δεν περιοριζόταν, ωστόσο, μόνο στις κατώτερες κοινωνικές τάξεις. Η βασιλική πρακτική των IMTAs εφαρμόστηκε ακόμη και κατά την εποχή της γαλλικής Αναγέννησης στο Château de Fontainebleau, όπως δείχνει η κατασκευή της λίμνης Etang aux Carpes, η οποία εξακολουθεί να υπάρχει μέχρι σήμερα. Ο βασιλιάς Ερρίκος IV είχε διατάξει το κτήμα να είναι αυτάρκες, ώστε να μην εξαρτάται από προμήθειες που κινδύνευαν να λεηλατηθούν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού από το Παρίσι (<https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/>).

Το 1639, το βιβλίο του Nong Zheng Quan Shu και του Xu Guangqi (το πλήρες βιβλίο για τη γεωργία), περιέγραφε πολλά θέματα, συμπεριλαμβανομένων της άρδευσης και της ταυτόχρονης παραγωγής ψαριών και υδρόβιων φυτών. Ανέφερε, επίσης και τη συνεκμετάλλευση των ψαριών με τα χερσαία εκτρεφόμενα ζώα και τη χρησιμοποίηση της κοπριάς στην ολοκληρωμένη παραγωγή ιχθυολιμνών (<https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/>).

Όλη αυτή η τεχνογνωσία άνθισε αργότερα, όταν ο John Ryther τη δεκαετία του 1970 ξεκίνησε εκ νέου τη συζήτηση σχετικά με τα IMTA συστήματα, ενώ τα Ωκεανογραφικά Ιδρύματα «Woods Hole» και «Harbor Branch» πραγματοποίησαν σημαντικές έρευνες σχετικά με την τεχνολογία των IMTA συστημάτων

[\(https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/\)](https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/).

Χρειάστηκαν τρεις παραγωγικές δεκαετίες σε αυτό που ονομάστηκε ποικιλοτρόπως πολυκαλλιέργεια, ολοκληρωμένη θαλάσσια καλλιέργεια ή υδατοκαλλιέργεια, οικολογικά κατασκευασμένη υδατοκαλλιέργεια και οικολογική υδατοκαλλιέργεια. Κατανοώντας την ανάγκη εναρμόνισης όλων αυτών των ονομάτων, ο Jack Taylor το 2004, συνδύασε την ολοκληρωμένη υδατοκαλλιέργεια και την πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια στον όρο «Ολοκληρωμένη Πολύ-Τροφική Υδατοκαλλιέργεια» (<https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/>).

1.2 Σημασία πολυτροφικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας

Η αύξηση του πληθυσμού οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση για τρόφιμα, ενώ η πίεση στο περιβάλλον λόγω της εντατικοποίησης των δραστηριοτήτων στον τομέα των τροφίμων αναδεικνύει την ανάγκη για αποτελεσματικότερη χρήση των φυσικών πόρων. Η υδατοκαλλιέργεια έχει να διαδραματίσει βασικό ρόλο στη διατροφή του αυξανόμενου πληθυσμού, αλλά πρέπει να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής για να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη ζήτηση για υγιεινά υδρόβια τρόφιμα. Ωστόσο, η αντιμετώπιση της βιωσιμότητας στην υδατοκαλλιέργεια είναι περίπλοκη, όχι μόνο λόγω της ύπαρξης πολλαπλών πλαισίων για την αξιολόγησή της, αλλά και λόγω της μεγάλης ποικιλίας συστημάτων παραγωγής στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν, προσεγγίσεις και εργαλεία αειφορίας (Checa et al., 2024).

Οι παραδοσιακές υδατοκαλλιέργειες, που κυριαρχούσαν στα τέλη του 20ου αιώνα χαρακτηρίζονται από το σχετικά μικρό μέγεθος των εκμεταλλεύσεων και τη χαμηλή πυκνότητα αποθεμάτων και δεν είναι πλέον σε θέση να αντιμετωπίσουν την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για ψάρια. Επιπλέον, η εντατικοποίηση των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας συνδέεται με διάφορα ζητήματα, συμπεριλαμβανομένης της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της αναποτελεσματικής χρήσης των πόρων. Η υιοθέτηση τεχνικών εντατικής υδατοκαλλιέργειας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των θρεπτικών στην υδάτινη στήλη, με αποτέλεσμα τον ευτροφισμό που επηρεάζει σημαντικά τα αποθέματα ιχθύων, τη βιομάζα και την τροφική κατάσταση της περιοχής γενικότερα. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του οξυγόνου,

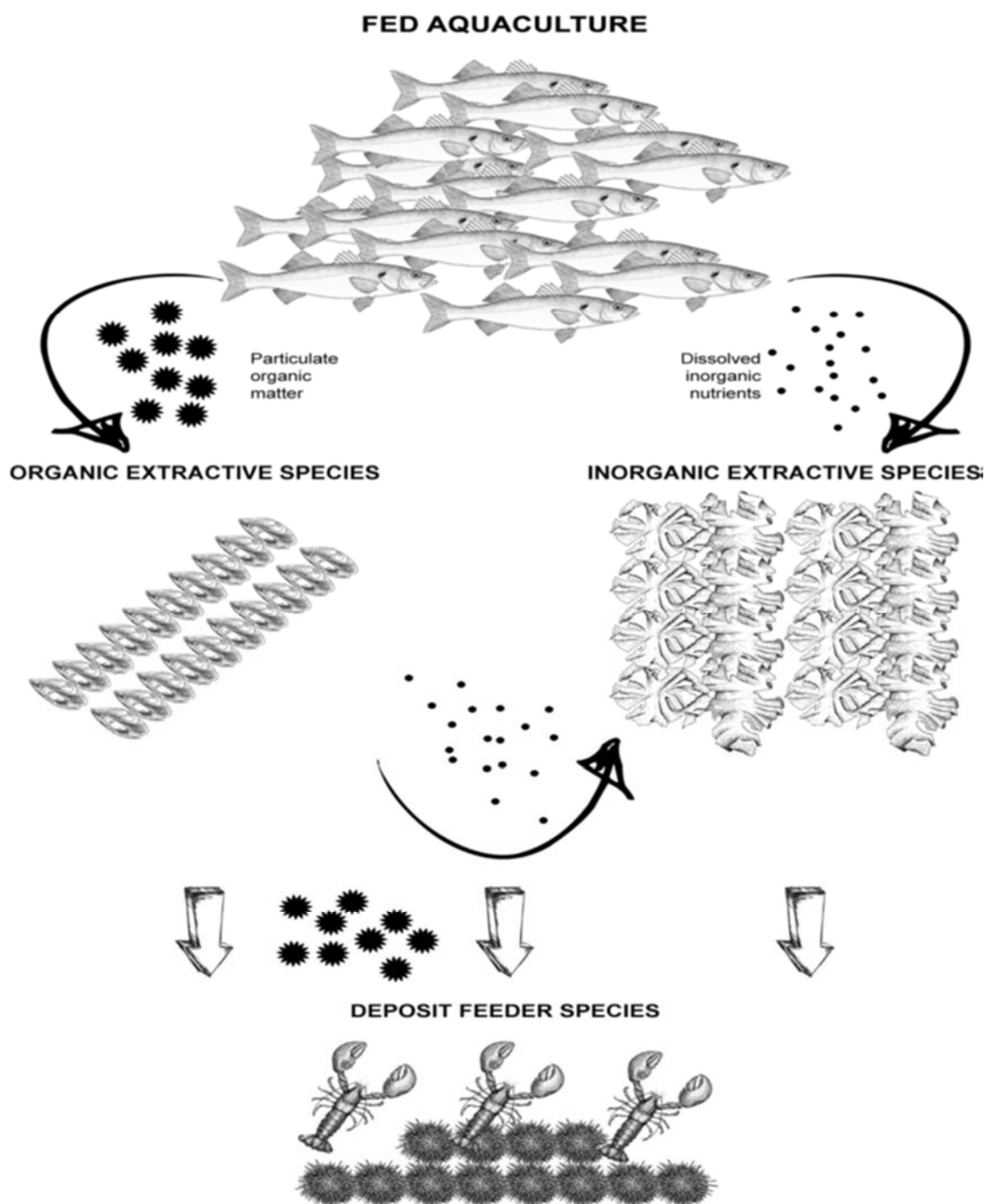
υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, εξάπλωση ασθενειών και πρόκληση ευρύτερων επιπτώσεων στις περιοχές εγκατάστασης και λειτουργίας υδατοκαλλιεργειών (Neofitou and Klaoudatos, 2008; Shinde et al., 2024).

Για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα συμβατικά συστήματα εκτροφής, σχεδιάστηκε ένα πρωτοποριακό σύστημα ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (Integrated Multi-Trophic Aquaculture system, IMTAs). Αυτή η πρακτική υδατοκαλλιέργειας βασίζεται στην ταυτόχρονη εκτροφή ή καλλιέργεια δύο ή περισσότερων ειδών, που ανήκουν σε διαφορετικά τροφικά επίπεδα, με τα είδη των χαμηλότερων τροφικών επιπέδων να επιλέγονται με βάση την ικανότητά τους να καταναλώνουν υπολείμματα τροφής και περιττώματα από τα ανώτερα τροφικά επίπεδα (Εικ. 1). Τα υπολείμματα τροφής, τα απόβλητα και τα διαλυμένα θρεπτικά συστατικά, μέσω της επαναχρησιμοποίησης τους μετατρέπονται σε ενέργεια, τροφή ή λίπασμα που επανατροφοδοτεί το σύστημα (Chopin et al., 2012).

Στο σύστημα αυτό δηλαδή, είδη από διαφορετικά τροφικά επίπεδα εκτρέφονται ταυτόχρονα και τα παραπροϊόντα (οργανικά και ανόργανα απόβλητα) του κύριου εκτρεφόμενου είδους (συνήθως ψάρια), χρησιμεύουν ως θρεπτικές εισροές για τα υπόλοιπα είδη, όπως δίθυρα, μακροφύκη, ολοθούρια, καρκινοειδή, κ.ά. (Knowler et al., 2020; Näsström, 2020). Τα είδη δηλαδή, που ανήκουν στο χαμηλότερο τροφικό επίπεδο (συνήθως φυτά ή ασπόνδυλα), χρησιμοποιούν απόβλητα προϊόντα, όπως περιττώματα και υπολείμματα ιχθυοτροφών από τα ανώτερα τροφικά είδη (συνήθως ψάρια), ως θρεπτικά συστατικά τα οποία ανακυκλώνουν. Τα είδη που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύστημα υδατοκαλλιέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός από τρόφιμα, για την παραγωγή φαρμάκων, καλλυντικών ή βιοκαυσίμων, προσφέροντας στον συγκεκριμένο τύπο επιχειρηματικής δραστηριότητας επιπλέον πολλαπλάσια έσοδα (<https://umaine.edu/cooperative-aquaculture/integrated-multi-trophicaquaculture/>).

Το IMTAs είναι εξαιρετικά ευέλικτο - ικανό σύστημα. Μπορεί να εφαρμοστεί στην ανοιχτή θάλασσα, στο γλυκό νερό και στα χερσαία συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Σημαντικό όμως είναι ότι οι οργανισμοί πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα με βάση τις λειτουργίες που έχουν μέσα στο οικοσύστημα. Για παράδειγμα, η χρησιμότητα των φυκιών στο βιοφιλτράρισμα των θρεπτικών συστατικών (Chopin et al., 2006), ή των ολοθούριων στη μείωση του οργανικού φορτίου στο ίζημα (Neofitou et al., 2019). Επομένως, στα συστήματα IMTAs, η επιλογή κατάλληλων

ειδών για εκτροφή και η εξέταση του κατάλληλου μεγέθους πληθυσμού τους είναι απολύτως απαραίτητη για την επίτευξη μιας βέλτιστης βιολογικής και χημικής διαδικασίας, βελτιώνοντας την υγεία του οικοσυστήματος και τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας (Khanjani et al., 2022).



Εικόνα 1. Αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας. Τα είδη που ανήκουν στο χαμηλότερο τροφικό επίπεδο χρησιμοποιούν τα απόβλητα προϊόντα, όπως περιττώματα και υπολείμματα ιχθυοτροφών, από τα ανώτερα τροφικά είδη (Rosa et al., 2020).

Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια βρίσκεται στο επίκεντρο της παγκόσμιας έρευνας τα τελευταία χρόνια, διότι θεωρείται ένας τρόπος για να γίνει η υδατοκαλλιέργεια πιο βιώσιμη και κερδοφόρα (<https://umaine.edu/cooperative-aquaculture/integrated-multi-trophicaquaculture/>).

1.3 Κριτήρια επιλογής ειδών για τα IMTAs

Σύμφωνα με τα συστήματα IMTA, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα είναι θεμελιώδης. Επομένως, η αξιολόγηση του φυσικού περιβάλλοντος αποτελεί βασικό παράγοντα της επιλογής των ειδών στα συστήματα αυτά. Τα ακόλουθα κριτήρια εφαρμόζονται για την επιλογή διαφόρων εκτρεφόμενων ειδών στα IMTAs (Shinde et al., 2024):

1. **Τροφικά επίπεδα:** Κατά την επιλογή διαφορετικών ειδών, πρέπει πρώτα να λαμβάνονται υπόψη τα διαφορετικά τροφικά επίπεδα. Τα απόβλητα του κύριου εκτρεφόμενου είδους είναι αναγκαίο να καταναλώνονται από τα άλλα είδη (χαμηλότερου τροφικού επιπέδου) του συστήματος (Barrington et al., 2009; Viji, 2015).
2. **Επιλογή ανθεκτικών ειδών:** Πρέπει εξ αρχής να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των πιο ανθεκτικών ειδών. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται πρώτα ενδημικά είδη για να αποφεύγεται η εξάπλωση μόλυνσης, καθώς και να επιτευχθεί πρόληψη της εισβολής παθογόνων (Largo et al., 2016; Shinde et al., 2024).
3. **Περιβαλλοντικές συνθήκες:** Για την κατασκευή ενός συστήματος IMTA θα πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (Sasikumar and Viji, 2016; Chopin, 2017).
4. **Αποτελεσματική βιοδιήθηση και βιοαποκατάσταση:** Τα επιλεγμένα είδη πρέπει να μπορούν να απορροφούν και να απομακρύνουν τα απόβλητα της υδατοκαλλιέργειας, για να ελαττώνουν τη συγκέντρωση των θρεπτικών αλάτων στην υδάτινη στήλη και του οργανικού φορτίου στο ίζημα (Shinde et al., 2024).
5. **Ζήτηση της αγοράς και προτίμηση των πελατών:** Είναι σημαντικό να επιλέγονται είδη που έχουν αποδεδειγμένα ζήτηση στην αγορά (Shi et al., 2013). Δηλαδή, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται είδη που οι πελάτες είναι πιθανό να θέλουν να αγοράσουν ή που έχουν καλή αγοραστική δύναμη, ώστε να

εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν η μεγαλύτερη πιθανότητα πώλησης των παραγόμενων προϊόντων και η αύξηση της κερδοφορίας της επιχειρηματικής δραστηριότητας.

1.4 Χώρες δραστηριοποίησης των IMTAs

1.4.1 Κίνα

Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός υδατοκαλλιέργειας στον κόσμο, με συνολική παραγωγή 34,1 εκατομμύρια τόνους, που αντιπροσωπεύει το 62% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής και το 51% της παγκόσμιας αξίας (Zhao et al., 2016). Πρόσφατες προβλέψεις δείχνουν ότι αυτό το ποσοστό θα διατηρηθεί έως το 2025 (FAO, 2016). Καθώς τα σύνορα της παραγωγής τροφίμων επεκτείνονται, η εκτροφή και η καλλιέργεια θαλάσσιων οργανισμών στις παράκτιες περιοχές και στον ανοιχτό ωκεανό αυξάνεται ραγδαία (Wartenberg et al., 2017).

Στην Ασία το σύστημα ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας εφαρμόζεται εδώ και αιώνες (<https://www.globalseafood.org/advocate/conscious-coupling-can-imta-gain-a-foothold-in-europe>). Οι δύο κύριες μέθοδοι θαλάσσιων συστημάτων IMTA είναι η εκτατική και η ημι-εντατική εκτροφή. Η πρώτη χρησιμοποιείται συνήθως για την ενίσχυση των φυσικών αποθεμάτων θαλάσσιων οργανισμών, ώστε να επιτευχθεί η διατήρηση της βιοποικιλότητας. Στη μέθοδο αυτή δεν υπάρχει πλήρης έλεγχος του περιβάλλοντος, διότι χαρακτηρίζεται από ελάχιστη παρέμβαση του ανθρώπου (Troell et al., 2009). Η δεύτερη αποτελεί την κυρίαρχη βιομηχανία των υδατοκαλλιεργειών στην Κίνα, στην οποία χρησιμοποιούνται διχτυωτοί κλωβοί, σχοινιά ή άλλες δομές που αιωρούνται στη στήλη του νερού για την εκτροφή υδρόβιων οργανισμών. Οι οργανισμοί τρέφονται τόσο από το φυσικό περιβάλλον όσο και από την τροφή που τους παρέχεται (όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο). Σε ορισμένες περιοχές της Κίνας οι εκτροφές προσεγγίζουν τις αποδόσεις τις εντατικής, δηλαδή παρέχεται τροφή στους εκτρεφόμενους οργανισμούς σε αποκλειστικό βαθμό (Wartenberg et al., 2017).

Στην Κίνα τα IMTAs χρησιμοποιούνται κυρίως σε δύο περιοχές. Το νησί Zhang Zi Dao, που βρίσκεται στη βόρεια Κίτρινη Θάλασσα, είναι γνωστό για τις οστρακοκαλλιέργειες, καθώς και για την εκτροφή άλλων θαλάσσιων οργανισμών. Η

εκτροφή αναπτύσσεται σε βάθος 10 έως 40 μέτρα, σε περιοχή που επικρατούν ισχυρά ρεύματα (έως 1 m/s). Η κύρια παραγωγή περιλαμβάνει μαλάκια (*Patinopecten yessoensis*, *Haliotis discus*, *Scapharca bringonii*) και το ολοθούριο (*Apostichopus japonicus*) (Troell et al., 2009).

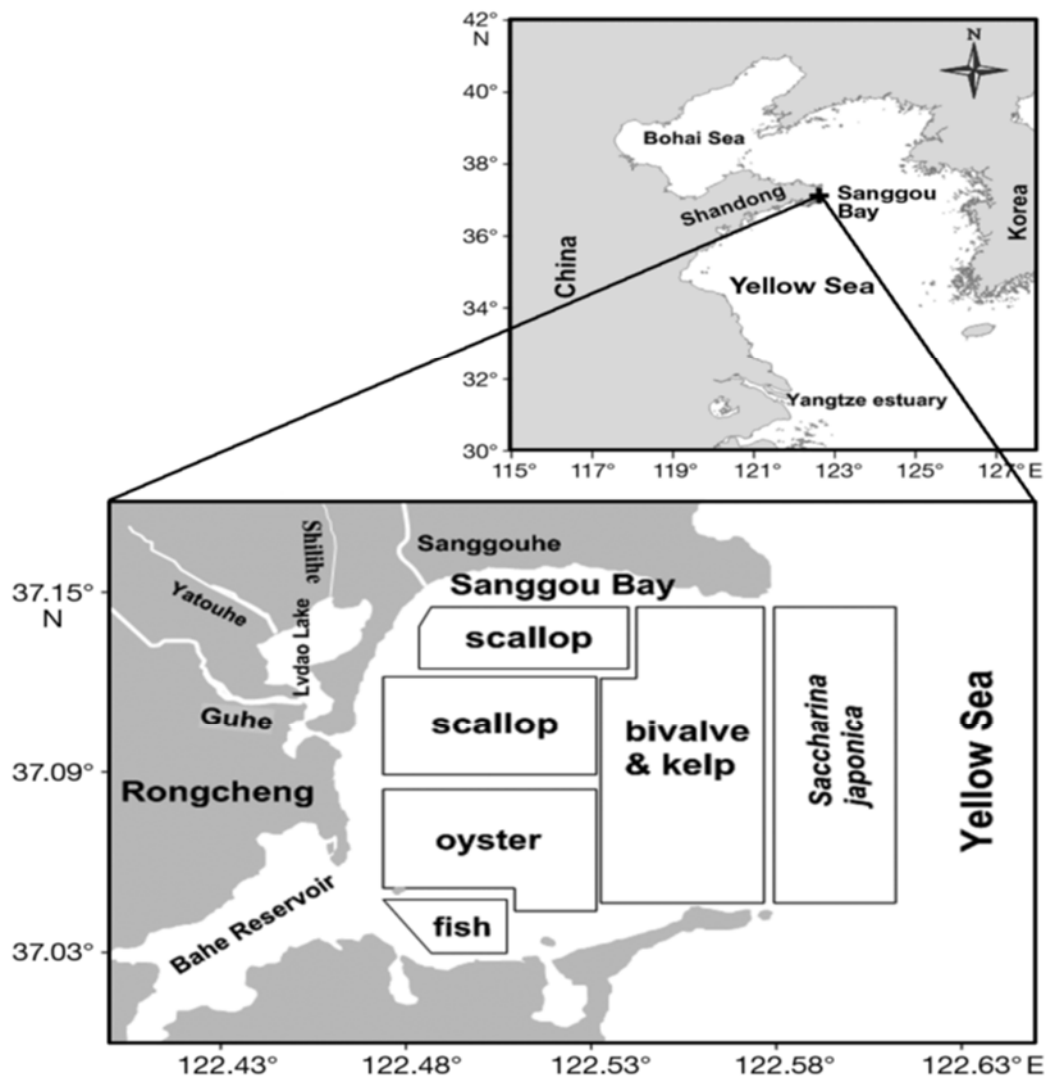
Το 2005, η παραγωγή ανήλθε στους 28.000 τόνους, αξίας άνω των 60 εκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, με καθαρό κέρδος 18 εκατομμύρια δολάρια. Γίνονται προσπάθειες βελτιστοποίησης των οικολογικών συνθηκών μέσω φυκιών, καθώς και της δημιουργίας τεχνητών υφάλων. Οι τεχνικές που περιλαμβάνουν την ταυτόχρονη εκτροφή διαφορετικών ειδών είναι επωφελούμενες από τις διαειδικές σχέσεις (δηλαδή τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ειδών) και τις υπάρχουσες υποδομές. Η υδατοκαλλιέργεια στο Zhang Zhi Dao είναι ένα παράδειγμα βιώσιμης ανάπτυξης, που συνδυάζει την οικονομική απόδοση με την περιβαλλοντική προστασία (Troell et al., 2009).

Ο κόλπος Sanggou (SGB) βρίσκεται στη βόρεια Κίνα (Εικ. 2), και χρησιμοποιείται για υδατοκαλλιέργεια για περισσότερα από 30 χρόνια (Zhao et al., 2016). Η ετήσια παραγωγή φυκών, ιχθύων, χτενιών και στρειδιών ήταν 84.500, 535, 15.000 και 60.000 τόνοι το 2012 (Ning et al, 2016). Η καλλιέργεια των φυκιών σε μακριές γραμμές (long line) έχει επεκταθεί σε περιοχές που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 8 km από την ακτή, όπου το βάθος του νερού κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 m, και με ρεύματα νερού έως και 60 cm/s (Troell et al., 2009).

1.4.2 Καναδάς

Ο Καναδάς έχει μακρά ιστορία τόσο στην αλιεία όσο και στην υδατοκαλλιέργεια και, ειδικότερα, κατέχει παγκόσμια ηγετική θέση στην επιστήμη και τη διατήρηση της αλιείας, την τεχνολογική καινοτομία και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, η καναδική βιομηχανία υδατοκαλλιέργειας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως αναπτυσσόμενη με τη συνολική παραγωγή να είναι μικρότερη από 10.000 τόνους. Η παραγωγή άρχισε να αυξάνεται απότομα το 1984 και μέχρι το 1991 η καναδική παραγωγή υδατοκαλλιέργειας ήταν 49.500 τόνοι με αξία περίπου 233,6 εκατομμύρια δολάρια Καναδά. Σήμερα ο Καναδάς έχει μακράν τη μεγαλύτερη ακτογραμμή στον κόσμο (202.080 km), και ακόμη και όταν εξαιρούνται περιοχές στην Αρκτική, ο Καναδάς εξακολουθεί να έχει σχεδόν 80.000 km θαλάσσιας ακτογραμμής, ικανή να υποστηρίξει την υδατοκαλλιέργεια και την αλιεία (περίπου την ίδια

ακτογραμμή με τη Νορβηγία, Αυστραλία και Ιαπωνία μαζί). Κατατάσσεται στην 25^η θέση όσον αφορά την παγκόσμια παραγωγή υδατοκαλλιέργειας (Noakes, 2018).



Εικόνα 2. Τοποθεσία του κόλπου Sanggou στην Κίνα και δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας. Απεικονίζονται οι περιοχές εκτροφής φυκών (*Saccharina japonica*), χτενιών, στρειδιών, ψαριών και η εκτροφή με σύστημα IMTA καφέ φυκιού με δίθυρα (Zhao et al., 2016).

Το Καναδικό Ολοκληρωμένο Δίκτυο Πολυτροφικής Υδατοκαλλιέργειας (CIMTAN) είναι ένα στρατηγικό δίκτυο του Συμβουλίου Ερευνών Φυσικών Επιστημών και Μηχανικής, που ξεκίνησε το 2010. Πυροδοτήθηκε από το γεγονός ότι η υδατοκαλλιέργεια, αν και ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος τομέας παραγωγής τροφίμων στον κόσμο, συνδέεται με το περιβάλλον, με οικονομικά αλλά και κοινωνικά ζητήματα. Έρευνα και ανάπτυξη για το IMTAs διεξάγεται τόσο στις ανατολικές όσο και στις δυτικές ακτές του Καναδά από το 2001. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί την τελευταία δεκαετία (Chopin et al., 2013).

Στην ανατολική ακτή του Καναδά, ο σολομός του Ατλαντικού (*Salmo salar*), τα φύκια (*Saccharina latissima* και *Alaria esculenta*) και το μπλε μύδι (*Mytilus edulis*), εκτρέφονται μαζί σε πολλές τοποθεσίες στον κόλπο του Fundy. Οι ρυθμοί ανάπτυξης φυκιών και μυδιών, που καλλιεργούνται και εκτρέφονται σε ιχθυοτροφεία ήταν 46 και 50% υψηλότεροι, αντίστοιχα, από ό,τι στις φυσικές περιοχές τους. Αυτό αποτυπώνει την αύξηση των θρεπτικών συστατικών και της διαθεσιμότητας τροφής από τους ιχθυοκλωβούς (Troell et al., 2009).

Ο απώτερος στόχος του CIMTAN είναι να αναπτύξει συστήματα υδατοκαλλιέργειας βιώσιμα και αποδοτικά, που μπορούν να υιοθετηθούν από τις βιομηχανίες για να συμβάλλουν στον αποτελεσματικό περιορισμό των επιπτώσεων που προκαλούνται από την υδατοκαλλιέργεια (Chopin et al., 2013).

Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια προσφέρει μια καινοτόμο λύση για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την οικονομική σταθερότητα και την κοινωνική αποδοχή της υδατοκαλλιέργειας, ακολουθώντας μια προσέγγιση διαχείρισης που βασίζεται στο οικοσύστημα. Συνεπώς, το IMTAs μπορεί να μετατρέψει τα περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά ζητήματα των υδατοκαλλιεργειών σε οφέλη για τις παράκτιες περιοχές της χώρας του Καναδά (Chopin et al., 2013).

1.4.3 Ευρώπη

Μολονότι η παγκόσμια παραγωγή υδατοκαλλιέργειας αυξήθηκε σημαντικά κατά την περίοδο 1990-2020, η συνολική παραγωγή εκτρεφόμενων θαλασσινών στα κράτη μέλη της ΕΕ παρέμεινε σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, στους 1,2 εκατομμύρια

τόνους περίπου. Η αξία της ευρωπαϊκής παραγωγής υδατοκαλλιέργειας έφθασε τα 3,9 δισεκατομμύρια ευρώ το 2020. Τα προϊόντα αλιείας αντιπροσώπευαν το 50% του αριθμού αυτού και τα μαλακόστρακα και μαλάκια το 49% από άποψη βάρους. Οι παραγωγοί υδατοκαλλιέργειας της ΕΕ επικεντρώθηκαν κυρίως σε τέσσερα είδη – μύδια (30 % της συνολικής ποσότητας), πέστροφα (17 %), στρείδια (9 %) και λυθρίνια (8 %) – ενώ άλλα σημαντικά εκτρεφόμενα είδη στην ΕΕ είναι ο κυπρίνος, το λαβράκι και ο τόνος (<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/120/παραγωγή-υδατοκαλλιέργειας-στην-ευρωπαϊκή-ένωση>).

Η Ευρώπη εξετάζει διαρκώς τις παγκόσμιες πρακτικές συστημάτων υδατοκαλλιέργειας που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, ωστόσο ακόμα δεν έχει ακόμη αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της στην ανάπτυξη του τομέα της βιώσιμης υδατοκαλλιέργειας (Laktuka et al., 2023). Μελέτες και διάφορα ερευνητικά προγράμματα εξετάζουν το σύστημα IMTA το οποίο εξακολουθεί να βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο.

Για παράδειγμα στην Ολλανδία τα συστήματα IMTA δεν εφαρμόζονται επί του παρόντος, διότι η χαμηλή θερμοκρασία του νερού τον χειμώνα και η υψηλή το καλοκαίρι καθιστούν δύσκολη την πλήρη ανάπτυξη ορισμένων ειδών ψαριών κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα χρήσης ψαριών σε συστήματα IMTA σε ανοιχτά συστήματα. Οι έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας επηρεάζουν την ανάπτυξη και την υγεία των ψαριών. Στο μέλλον, η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας, λόγω της κλιματικής αλλαγής, μπορεί να δημιουργήσει πιο ευνοϊκές συνθήκες για την εκτροφή ψαριών που σήμερα δεν μπορούν να αναπτυχθούν πλήρως (Van de Grootevheen et al., 2021).

Το 2020 χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Horizon η έρευνα για το IMPAQT (Intelligent Management system for Integrated Multi-trophic Aquaculture). Το πρόγραμμα αυτό περιγράφει την αρχιτεκτονική του συστήματος IMTA, τις τεχνολογίες του, και τις πιλοτικές δοκιμές που έγιναν σε διάφορες τοποθεσίες, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ολλανδία, την Ιρλανδία και την Τουρκία (Stanley, 2019).

Σε μια από τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιρλανδία τον Νοέμβριο του 2020, διαπιστώθηκε ότι οι νεαροί αστακοί θα μπορούσαν να εκτραφούν σε κλουβιά προσαρτημένα σε μονάδες σολομού ως μέρος ενός

ολοκληρωμένου συστήματος πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας
(<https://www.globalseafood.org/advocate/conscious-coupling-can-imta-gain-a-foothold-in-europe/>).

Παρόλες τις πειραματικές δοκιμές που έγιναν εξακολουθούν να υπάρχουν πολύ λίγες πληροφορίες στην Ευρώπη σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις, τους κινδύνους και τις επιπτώσεις των IMTAs. Η γνώση των συστημάτων IMTA σε εμπορικό επίπεδο σχετικά με τις επιπτώσεις, τη βιοασφάλεια, τη διαχείριση ασθενειών και τις δυνατότητές τους να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα του οικοσυστήματος, δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως. Η εκτροφή δύο ή περισσότερων ειδών μαζί, είναι κάτι πρωτόγνωρο για την Ευρώπη, παρόλο που στην Ασία ασκείται εδώ και αιώνες
(<https://www.globalseafood.org/advocate/conscious-coupling-can-imta-gain-a-foothold-in-europe/>).

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

2.1 Συμβολή εκτρεφόμενων ειδών

2.1.1 Ιχθυοκαλλιέργεια

Η εκτροφή ψαριών υψηλής διατροφικής αξίας είναι ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των συστημάτων IMTA. Ωστόσο, όπως προ αναγράφηκε δύο από τους βασικούς παράγοντες για την επιλογή των ειδών στα συστήματα αυτά αποτελούν η προσαρμοστικότητα - ανθεκτικότητα και η εμπορική αξία. Επομένως, τα ενδημικά είδη υψηλής εμπορικής αξίας θα πρέπει να έχουν προτεραιότητα (Khanjani et al., 2022).

Μέχρι σήμερα, αρκετά είδη ψαριών έχουν δοκιμαστεί για χρήση στα συστήματα IMTA ως είδη χαμηλότερου τροφικού επιπέδου, όπως ο κέφαλος (*Mugil liza*) (Εικ. 3). Το είδος αυτό εκτός των άλλων καταναλώνει φυτική ύλη που παράγεται από το οργανικό φορτίο της εκτροφής που καταλήγει στο επιφανειακό ίζημα του πυθμένα, δίνοντάς του το πλεονέκτημα να ανακυκλώνει θρεπτικά συστατικά από τα απόβλητα των IMTA συστημάτων (Khanjani et al., 2022).



Εικόνα 3. Ο κέφαλος (*Mugil liza*), ένα χαρακτηριστικό είδος χαμηλού τροφικού επιπέδου που χρησιμοποιείται στα IMTA συστήματα για την ανακύκλωση των θρεπτικών από τα απόβλητα της εκτροφής (<https://www.fishbase.se/search.php>).

2.1.2 Πολύχαιτοι

Οι πολύχαιτοι (Εικ. 4) συμβάλλουν επίσης σε σημαντικές οικολογικές λειτουργίες που ενισχύουν τη περιβαλλοντική ισορροπία στις υδατοκαλλιέργειες. Μέσω διαδικασιών όπως η βιοδιήθηση, οι πολύχαιτοι παίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση των βιογεωχημικών διεργασιών και στη μείωση του οργανικού φορτίου στο ίζημα (Khanjani et al., 2022).

Μια άλλη ενδιαφέρουσα πτυχή των πολύχαιτων είναι η βλέννα ορισμένων ειδών, η οποία μπορεί να έχει βιοδραστικές ιδιότητες, με δυνατότητες χρήσης στη βιοτεχνολογία. Αυτές οι αρχές ανοίγουν νέες προοπτικές για τη χρήση τους σε διάφορους τομείς, όπως η βιομηχανία φαρμάκων και καλλυντικών (Rosa et al., 2020).

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες σχετικά με τη χρήση αυτών των ειδών στα συστήματα IMTA. Η ικανότητα διήθησης των πολύχαιτων μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση επιβλαβών ουσιών, όπως μέταλλα και υπολείμματα φαρμακευτικών προϊόντων. Η χρήση αντιβιοτικών και φαρμάκων στην υδατοκαλλιέργεια είναι για τον έλεγχο ασθενειών και την διασφάλιση της ευζωίας των εκτρεφόμενων οργανισμών. Εντούτοις, αυτά τα φαρμακευτικά προϊόντα μπορούν να καθιζάνουν στο ίζημα από το οποίο τρέφονται οι πολύχαιτοι (Rosa et al., 2020).



Εικόνα 4. Πολύχαιτος του είδους *Diopatra cuprea*. Οι πολύχαιτοι έχουν την ικανότητα απορρόφησης θρεπτικών από το ίζημα, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την οργανική ρύπανση (https://www.flickr.com/photos/artour_a/2875855754/galleries/).

2.1.3 Ολοθούρια

Τα ολοθούρια (*Holothuroidea*), γνωστά και ως "θαλάσσια αγγούρια", ανήκουν στο φύλο των εχινοδέρμων (*Echinodermata*) και αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους οργανισμούς των βενθικών οικοσυστημάτων. Οι οργανισμοί αυτοί διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη βιολογική ανακύκλωση του οργανικού υλικού και στη διατήρηση της υγείας του ιζήματος (Zamora et al., 2016).

Η οικολογική τους σημασία έγκειται στην ικανότητά τους να επεξεργάζονται βενθικά ιζήματα πλούσια σε οργανικό υλικό. Μέσω της θρυμματοφαγικής διατροφής τους, τα ολοθούρια απομακρύνουν οργανικά υπολείμματα, μειώνουν το φορτίο οργανικής ύλης και βελτιώνουν την οξυγόνωση του ιζήματος. Συγκεκριμένα, είδη όπως το *Australostichopus mollis* (Εικ. 5) και το *Holothuria tubulosa* (Neofitou et al., 2019), έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικά στη μείωση του οργανικού φορτίου σε υποστρώματα εγκαταστάσεων ιχθυοκαλλιέργειών. Επιπλέον, οι θρεπτικές ουσίες που εκκρίνουν τα ολοθούρια, όπως το ανόργανο άζωτο και ο φώσφορος, ενισχύουν την πρωτογενή παραγωγή και προάγουν τη βιοποικιλότητα. Η δράση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε oligotrophic οικοσυστήματα, όπου τα ανόργανα θρεπτικά είναι περιορισμένα (Zamora et al., 2016).

Ένας από τους σημαντικότερους ρόλους των ολοθοურიων εντοπίζεται στα ολοκληρωμένα πολυτροφικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Σε αυτά τα συστήματα, τα ολοθούρια λειτουργούν ως αποικοδομητές που επεξεργάζονται τα απόβλητα των εκτρεφόμενων ψαριών και άλλων οργανισμών, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας. Με τη συμβολή τους, ανακυκλώνονται οι θρεπτικές ουσίες, που διαφορετικά θα συσσωρεύονταν στο ιζήμα, εξασφαλίζοντας την αειφορική διαχείριση των συστημάτων αυτών. Η συμβολή τους καθιστά τα ολοθούρια βασικό παράγοντα για τη μείωση της οργανικής ρύπανσης και την ενίσχυση της περιβαλλοντικής ισορροπίας (Zamora et al., 2016).

Η εμπορική αξία των ολοθοურიων είναι επίσης αξιοσημείωτη, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραδοσιακή ιατρική και ως διατροφικό προϊόν, κυρίως στην Ασία. Ωστόσο, η αυξημένη ζήτηση έχει οδηγήσει σε υπεραλίευση, μειώνοντας τους φυσικούς πληθυσμούς τους. Η ανάγκη προστασίας των ειδών αυτών είναι επιτακτική, μέσω της τεχνητής αναπαραγωγής και της θαλάσσιας εκτροφής, που

στοχεύουν στη διατήρηση και την αποκατάσταση των φυσικών αποθεμάτων (Zamora et al., 2016).

Τα ολοθούρια αποτελούν έναν κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης στις υδατοκαλλιέργειες. Η κατανόηση του ρόλου τους, καθώς και η εφαρμογή στρατηγικών για τη διαχείριση και την προστασία τους, είναι απαραίτητες για την υποστήριξη υγιών οικοσυστημάτων και αειφορικών πρακτικών παραγωγής (Zamora et al., 2016).



Εικόνα 5. Ολοθούριο του είδους *Australostichopus mollis*. Τα ολοθούρια είναι βενθικοί οργανισμοί με πολύτιμο ρόλο στην επεξεργασία των αποβλήτων του ιζήματος (<https://static.inaturalist.org/photos/90227656/large.jpg>).

2.1.4 Καρκινοειδή

Τα καρκινοειδή θεωρούνται από τα κύρια είδη για εκτροφή σε συστήματα IMTA (Khanjani et al., 2022). Πολλά καρκινοειδή που εκτρέφονται με επιτυχία σε σύστημα IMTA είναι οι γαρίδες, τα καβούρια και οι αστακοί. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ειδών γαρίδας, όπως π.χ τα είδη *Penaeus merguensis* (Εικ. 6), *P. indicus*, *P. Monodon* και *Metapenaeus ensis* στους ορυζώνες του Βιετνάμ αποδείχθηκε αποτελεσματική. Ορισμένα είδη καρκινοειδών εκτρέφονται ήδη σε λίμνες σε σύστημα IMTA στην Ινδονησία και τη Νοτιοανατολική Ασία (γαρίδες, όπως τα είδη *Penaeus vannamei*, *P. Stylirostris* και *P. Monodon* ή καβούρια, όπως το είδος *Scylla sp.*). Επίσης, πολλά είδη αστακών εκτρέφονται με IMTAs, όπως τα *Panulirus sp*, *Homarus americanus* και *H. gammarus*. Ταυτόχρονα, μικρά αμφίποδα που αναπτύσσονται φυσικά σε εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας μπορούν να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν ως φυσική τροφή για εκτρεφόμενα είδη (Rosa et al., 2020).



Εικόνα 6. Γαρίδα του είδους *Penaeus merguensis*. Ένα χαρακτηριστικό των καρκινοειδών είναι η δυνατότητα εκτροφής τους σε ορυζώνες (<https://marinebiodiversity.org.bd/species/penaeus-merguiensis/>).

2.1.5 Μύδια

Η εκτροφή μυδιών έχει προταθεί ως μέτρο για τη μείωση του φαινομένου του ευτροφισμού. Η κύρια θετική περιβαλλοντική επίδραση της εκτροφής μυδιών είναι ότι τα θρεπτικά συστατικά απομακρύνονται από το θαλάσσιο οικοσύστημα κατά τη συγκομιδή των εκτρεφόμενων μυδιών (Εικ. 7). Η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών, μέσω της διήθησης του φυτοπλαγκτού και άλλων σωματιδίων, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών και φυτοπλαγκτού στο υδάτινο περιβάλλον, με αποτέλεσμα τη μείωση της θολερότητας του νερού. Μύδια, όπως αυτά των ειδών *Mytilus edulis*, *Mytilus trossulus*, *Patinopecten yessoensis*, και *Crassostrea gigas* είναι υποσχόμενα για εκτροφή σε συστήματα IMTA (Rosa et al., 2020).



Εικόνα 7. Τα θρεπτικά συστατικά απομακρύνονται κατά τη συγκομιδή των μυδιών, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας του νερού (Van de Grootevheen et al., 2021).

2.1.6 Φύκη

Τα φύκη (Εικ. 8) είναι οργανισμοί που αντιπροσωπεύουν μια οικολογικά σημαντική ομάδα που εξυπηρετεί πολλές λειτουργίες, όπως η εκτεταμένη συμβολή τους στην πρωτογενή παραγωγή των ποτάμιων εκβολικών οικοσυστημάτων και η συμμετοχή τους στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών με τη μετατροπή ανόργανων συστατικών σε βιομάζα, η οποία στη συνέχεια θα μεταφερθεί σε ανώτερα τροφικά επίπεδα. Η μεγάλη επιφάνεια των φυκών σε σχέση με τον όγκο τους, ευνοεί την ταχεία απορρόφηση θρεπτικών συστατικών, ιδιαίτερα του αζώτου και του φωσφόρου. Αυτό οδηγεί σε αυξημένους ρυθμούς ανάπτυξης και παραγωγής, με αποτέλεσμα τη σημαντική συσσώρευση βιομάζας (Vijayaram et al., 2024). Η ικανότητα αυτή τα καθιστά πολύτιμα στα συστήματα IMTA, και ως εκ τούτου, τα φύκη χρησιμοποιούνται ως βιοαποκαταστάτες στις εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας. Το γεγονός ότι η Κίνα χρησιμοποιεί φύκια ως βιοαποκαταστάτες, είναι ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους ο παράκτιος ευτροφισμός δεν είναι τόσο κρίσιμος, καθώς 10 εκατομμύρια τόνοι φυκών που συγκομίζονται ετησίως μπορούν να αφαιρέσουν εκατοντάδες χιλιάδες τόνους φωσφόρου και αζώτου από το νερό (Rosa et al., 2020). Επιπλέον, η αξία αυτών των οργανισμών δεν περιορίζεται μόνο στο βιοφιλτράρισμα, καθώς τα φύκη αποτελούν

ένα είδος με εμπορική αξία. Η πιο πρόσφατη έκθεση του FAO αναφέρει ότι 30,1 εκατομμύρια τόνοι υδρόβιων φυτών (που αντιπροσωπεύουν 11,7 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ) εκτράφηκαν το 2016, με τη συντριπτική πλειοψηφία να αποτελείται από φύκη (FAO, 2018).



Εικόνα 8. Συγκομιδή φυκών του είδους *Saccharina latissima*, σε μια τοποθεσία ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας στον κόλπο του Fundy στον Καναδά. Τα φύκη αφαιρούν τα διαλυμένα ανόργανα θρεπτικά συστατικά από το οικοσύστημα, ενώ παρέχουν ποικίλα εμπορικά προϊόντα (Chopin et al., 2013).

2.1.7 Σπόγγοι

Τα σφουγγάρια χρησιμοποιούνται για βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας. Από περιβαλλοντική άποψη, τα σφουγγάρια των ωκεανών μπορούν να λειτουργήσουν ως βιοφίλτρα και βιοαποκαταστάτες. Η δημιουργία σπογγοτροφείων δεν έχει επηρεάσει αρνητικά τους φυσικούς πληθυσμούς κοραλλιών ή σφουγγαριών και σε ορισμένες περιπτώσεις ενισχύουν τα φυσικά αποθέματα. Στη διαδικασία εκτροφής σφουγγαριών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποσπασμένα τμήματα ή θραύσματα από σφουγγάρια που είναι ήδη εγκατεστημένα σε ένα οικοσύστημα. Αυτά τα θραύσματα μπορούν να αναπτυχθούν και να δημιουργήσουν νέα σφουγγάρια, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή τους, χωρίς την ανάγκη για επιπλέον τροφή, καθώς τα σφουγγάρια απορροφούν θρεπτικά συστατικά από το νερό (<https://thefishsite.com/articles/soaking-up-the-benefits-of-sea-sponge-aquaculture>). Στα συστήματα IMTA, η χρήση των σπόγγων (Εικ. 9) χρησιμεύει στη μετατροπή της διαλυμένης οργανικής ύλης (DOM) σε σωματιδιακή οργανική ύλη (POM), που μπορεί να καταναλωθεί από τους

ιζηματοφάγους και αιωρηματοφάγους οργανισμούς, όπως είναι τα ολοθούρια (Gökalp et al., 2020).

Σε Πειραματική εκτροφή σε IMTAs συνδυάστηκαν φύκη-σφουγγάρια-ολοθούρια. Αποδείχθηκε ότι τα σφουγγάρια είναι ικανά να μετατρέπουν τα οργανικά εκκρίματα από τα φύκη σε σωματιδιακή τροφή του ολοθούριου, και να αυξάνουν την παραγωγή των φυκών, μέσω των ανόργανων θρεπτικών εκκρίσεών τους (π.χ. φωσφορικά, αμμώνιο, νιτρικά). Επιπλέον, ως ωφέλιμο αποτέλεσμα, οι σπόγγοι βελτιώνουν την ποιότητα του νερού γύρω από το σύστημα IMTA, μειώνοντας το μικροβιακό φορτίο. Ακόμα, τα σφουγγάρια στο σύστημα IMTA μπορούν να μετατρέψουν μέρος του DOM και διάφορα υπολείμματα τροφής (σωματίδια) σε βιομάζα σφουγγαριών. Αυτή η βιομάζα μπορεί να συλλεχθεί για εμπορικούς σκοπούς, όπως πωλήσεις ως φυσικά σφουγγάρια μπάνιου (Gökalp et al., 2020).

Καθώς πολλά είδη σφουγγαριών είναι υπό εξαφάνιση, αυξάνονται οι προσπάθειες για την ανάκτηση φυσικών πληθυσμών. Από τεχνητούς υφάλους έως κάθετους συλλέκτες, αναδύονται ιδέες για διαφορετικές δομές αποκατάστασης για την αύξηση της βιοποικιλότητας και τη δημιουργία ενός βιότοπου για αυτά τα είδη. Η μεταμόσχευση σφουγγαριών σε περιοχές όπου είχαν σχεδόν εξαφανιστεί έχει θεωρηθεί ως μια βιώσιμη επιλογή για την ανάκτηση των πληθυσμών αυτών των οργανισμών, με 100% ποσοστά επιβίωσης και διατήρησης γόνιμων ατόμων. Αυτό συμβάλλει στην ενίσχυση της φυσικής εγκατάστασης άλλων οργανισμών, όπως τα κοράλλια (Aguilo-Arce et al., 2023).



Εικόνα 9. Σπόγγοι που εκτρέφονται σε σύστημα IMTA μαζί με φύκη, ανεμώνες, ασκίδια και πολύχαιτους. *Sarcotragus spinosulus* (a), *Aplysina aerophoba* (b) (Aguilo-Arce et al., 2023).

Τα συστήματα IMTA μπορούν να προταθούν για λόγους περιβαλλοντικής αποκατάστασης και διατήρησης. Στην περίπτωση των σπόγγων, η βιομάζα που λαμβάνεται μπορεί να αξιοποιηθεί για μεταμόσχευση ή ανανέωση του αποθέματος απειλούμενων ή ευάλωτων ειδών μέχρι την αποκατάσταση του βένθους. Εκτός από την περιβαλλοντική αξία, η δημιουργία αυτών των οικοσυστημάτων και η έμμεση εγκατάσταση άλλων ειδών θα μπορούσε να αποτελέσει σημείο αναφοράς του υποθαλάσσιου τουρισμού που, με μηδενικό κόστος θα αποφέρει έσοδα στην τοπική κοινωνία (Aguilo-Arce et al., 2023).

2.2 Παθογόνα

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται σε όλες τις υδατοκαλλιέργειες είναι η επίδραση ρυπαντικών οργανισμών και παθογόνων που επηρεάζουν τόσο τον ίδιο τον οργανισμό όσο και την υγεία των ανθρώπων που τους καταναλώνουν (Näsström et al., 2020).

Σήμερα, οι 15 μεγάλες χώρες παραγωγής υδατοκαλλιέργειας (Κίνα, Ινδονησία, Ινδία, Βιετνάμ, Μπαγκλαντές, Φιλιππίνες, Νότια Κορέα, Αίγυπτος, Νορβηγία, Χιλή, Μιανμάρ, Ιαπωνία, Σιάμ, Λαϊκή Δημοκρατία της Κορέας, Βραζιλία) χρησιμοποιούν κατά μέσο όρο 15 ενώσεις αντιβιοτικών για τη θεραπεία της υδατοκαλλιέργειας τους (Lulijwa et al., 2019). Το σύστημα IMTA έχει τη φυσική ικανότητα, μέσω βιοδιήθησης που μπορεί να περιορίσει τη πιθανότητά εκδήλωσης ασθένειας και έτσι να μειώσει την «ανάγκη» για αντιβιοτικά. Μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι το μπλε μύδι (*Mytilus edulis*) έχει την ικανότητα να εξαλείφει ορισμένα παθογόνα (*Renibacterium salmoninarum*) σε μονάδα εκτροφής μπακαλιάρου, μειώνοντας έτσι το ιϊκό φορτίο των βακτηρίων. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι, ενδέχεται να συγκεντρωθούν άλλα βακτήρια, όπως το *Vibrio anguillarum*, τα οποία θα μπορούσαν να απελευθερωθούν ξανά στο περιβάλλον, εξαιτίας π.χ. μιας μεγάλης καταιγίδας. Αν και, αυτό είναι κυρίως ανησυχητικό σε ρηχές τοποθεσίες, σε αντίθεση με εκτροφές που πραγματοποιούνται σε υπεράκτιες περιοχές, όπου το βάθος είναι μεγαλύτερο, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο να συμβεί ένα τέτοιο γεγονός (Pietrak et al., 2012).

2.3 Αντιβιοτικά

Αντιβιοτικό είναι ένα φάρμακο φυσικής ή συνθετικής προέλευσης, που έχει την ικανότητα να εξουδετερώνει ή να αναστέλλει την ανάπτυξη μικροοργανισμών (FAO, 2005). Τα αντιβιοτικά χρησιμοποιούνται ως θεραπευτικά μέσα, ωστόσο ένα από τα προβλήματα από τη χρήση τους είναι ότι οι ίδιες ιδιότητες που τα καθιστούν αποτελεσματικά απέναντι στους επιθυμητούς μικροοργανισμούς, μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις σε άλλους οργανισμούς που δεν είναι στόχοι της θεραπείας (Kümmerer et al., 2009; Leston et al., 2013). Η απότομη ανάπτυξη της ιχθυοκαλλιέργειας οδήγησε σε αύξηση της χορήγησης αντιβιοτικών, με περίπου το 80% των αντιβιοτικών που χρησιμοποιούνται να καταλήγουν στο περιβάλλον (Lalumera et al., 2004; Sapkota et al., 2008; Cabello et al., 2013), αφού μόνο ένα μέρος απορροφάται ή μεταβολίζεται από τους εκτρεφόμενους οργανισμούς. Τα αντιβιοτικά χρησιμοποιούνται είτε σε προληπτικές είτε σε θεραπευτικές δόσεις. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα αντιβιοτικά στις υδατοκαλλιέργειες παγκοσμίως είναι η οξυτετρακυκλίνη (FAO, 2012), που είναι αποτελεσματικό έναντι διαφόρων τύπων βακτηρίων και ορισμένων αναερόβιων οργανισμών (FAO, 2005).

Μολονότι υπάρχει μια τάση διακοπής της χρήσης αντιβιοτικών σε προληπτική βάση, με αυστηρότερους κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί, μεγάλο μέρος της παραγωγής της υδατοκαλλιέργειας πραγματοποιείται σε χώρες όπου αυτοί οι κανονισμοί δεν τηρούνται επαρκώς ή δεν είναι τόσο αυστηροί (Cole et al., 2009; BurrIDGE et al., 2010; Defoirdt et al., 2011; Cabello et al., 2013). Επίσης, μπορεί να μην υπάρχουν επιδράσεις σε οργανισμούς μη στόχους, αλλά μπορεί να αναπτυχθεί ανθεκτικότητα στα αντιβιοτικά, λόγω της μακροχρόνιας χρήσης τους, ακόμη και σε υποθεραπευτικές δόσεις, προκαλώντας μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον (Kummerer et al., 2004; Armstrong et al., 2005; Cole et al., 2009; Kümmerer et al., 2009; Tuševljak et al., 2012). Στις ΗΠΑ, για παράδειγμα, επιτρέπεται η χρήση αντιβιοτικών στις περισσότερες εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας. Μετά τη συγκομιδή, αυτές οι δομές συχνά δεν αποστραγγίζονται πλήρως, γεγονός που οδηγεί στη συσσώρευση υψηλών επιπέδων φαρμάκων, επηρεάζοντας την υγεία των εκτρεφόμενων ψαριών (FAO, 2005).

Η παρουσία αντιβιοτικών στους βρώσιμους ιστούς των ψαριών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το δοσολογικό σχήμα, τη μέθοδο χορήγησης, το είδος και το μέγεθος των ψαριών, καθώς και από αβιοτικούς παράγοντες, όπως η αλατότητα και

η θερμοκρασία του νερού. Στα συστήματα IMTA, τα αντιβιοτικά που χρησιμοποιούνται στα ψάρια μπορούν να απορροφηθούν και από τα είδη που ανήκουν στο κατώτερο τροφικό επίπεδο που εκτρέφονται ταυτόχρονα, αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερευαισθησίας στα φάρμακα, αντιμικροβιακής αντοχής, κτλ. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει τροφικές αλλεργίες ή ακόμα και καρκινογόνο δράση στον τελικό καταναλωτή (Rosa et al., 2020).

2.4 Έλεγχος αιωρούμενων στερεών

Η απελευθέρωση αιωρούμενων στερεών από τις εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας μπορεί να επιβαρύνει το περιβάλλον. Συνεπώς, η διαχείριση αυτών είναι μία από τις προκλήσεις που οφείλουν να διερευνήσουν οι ενδιαφερόμενοι επαγγελματίες. Το υψηλό ποσοστό ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS – Total Suspended Solids), υποβαθμίζει την ποιότητα του νερού και μπορεί να οδηγήσει σε ανοξικές συνθήκες, με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανάπτυξη, εμφάνιση ασθενειών ακόμα και θνησιμότητα στα εκτρεφόμενα είδη, π.χ. απόφραξη των βραγχίων στις γαρίδες (Ray et al., 2010). Το αυξημένο ποσοστό TSS αυξάνει επίσης, το ενεργειακό κόστος, λόγω της αυξημένης δυσκολίας στη διατήρηση των επιθυμητών επιπέδων οξυγόνου (Gaona et al., 2011; Crab et al., 2012; Gaona et al., 2015).

Όπως ήδη προ αναγράφηκε, στα συστήματα IMTA, οργανισμοί από διαφορετικά τροφικά επίπεδα (φύκη, μύδια, ψάρια χαμηλού τροφικού επιπέδου, κτλ.) χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση αιωρούμενων και διαλυμένων στερεών (Chopin et al., 2013; Rosa et al., 2020; Khanjani et al., 2022). Η κατάλληλη επιλογή αυτών των ειδών στα IMTAs μπορεί να μειώσει σημαντικά τα απόβλητα που παράγονται στο σύστημα. Τιμές TSS που κυμαίνονται μεταξύ 400 και 500 mg L⁻¹ συνιστώνται για την εκτροφή θαλάσσιων γαρίδων (Samocha et al., 2007; Ray et al., 2010), ενώ τιμές 200–500 mg L⁻¹ TSS προτείνονται για τη διασφάλιση της σωστής ανάπτυξης γαρίδων, καθώς και για τη βέλτιστη ποιότητα του νερού (Avnimelech, 2009). Τα δίθυρα έχουν αποδειχθεί ότι μειώνουν τα TSS στο σύστημα IMTA και, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο BFT (Biofloc Technology) για τη διαχείριση των κροκίδων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του νερού (Chopin et al., 2001; Gaona et al., 2016).

2.5 Θρεπτικά άλατα

Τα θρεπτικά άλατα και το φως είναι βασικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που καθορίζουν τους ρυθμούς ανάπτυξης και την παραγωγικότητα των φυκών (Harrison et al., 2001). Η αναλογία αζώτου/φωσφόρου έχει αποδειχθεί ότι έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση βιομάζας των φυκών, την παραγωγή επίφυτων οργανισμών και την τροφική κατάσταση της περιοχής, γενικότερα. Το άζωτο συνήθως περιορίζει την πρωτογενή παραγωγή στις θαλάσσιες παράκτιες περιοχές, και αυτός ο περιορισμός μπορεί να είναι ακόμη πιο σοβαρός σε υπεράκτιες περιοχές με χαμηλή περιεκτικότητα θρεπτικών αλάτων (Troell et al., 2009). Η αμμωνία, η κύρια ένωση αζώτου που εκκρίνεται από τα ψάρια, επιταχύνει την ανάπτυξη των φυκών (Troell et al., 1997). Καθώς τα υπεράκτια ύδατα έχουν συνήθως χαμηλότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών από τα παράκτια περιβάλλοντα, η θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυκών από τα απεκκρίματα των ψαριών εκεί μπορεί να είναι πιο έντονη. Ωστόσο, εάν οι φυσικές συγκεντρώσεις των διαλυμένων θρεπτικών ουσιών στο νερό είναι εξαιρετικά χαμηλές, η ανάπτυξη φυκών μπορεί να περιοριστεί, ακόμη και αν εμπλουτίζεται το νερό με θρεπτικά από τις ιχθυοκαλλιέργειες (Troell et al., 1997; Buschmann et al., 2001; 2008).

Για την καλλιέργεια φυκών απαιτείται σχετικά μεγάλη περιοχή, λόγω του γεγονότος ότι η ανάπτυξή τους εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο επιφανειακό στρώμα της υδάτινης στήλης, ενώ άλλοι οργανισμοί μπορούν να εκτραφούν σε μεγαλύτερα βάθη. Σύμφωνα με έρευνες, μια μονάδα με 100 εκτάρια καλλιέργειας του φύκου *Gracilaria* μπορεί να απορροφήσει και να αφαιρέσει περίπου το 80% του φορτίου του αζώτου που παράγεται από μια μονάδα εκτροφής σολομού χωρητικότητας 1.500 τόνων (Buschmann et al., 2008; Abreu et al., 2009).

Οι σωστές εισροές θρεπτικών αλάτων επηρεάζουν επίσης, την περιεκτικότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Τα θρεπτικά βοηθούν τα φύκη να αναπτυχθούν σωστά και αυξάνουν την παραγωγή συγκεκριμένων συστατικών που είναι επιθυμητά στην υδατοκαλλιέργεια, όπως τα φυκοκολλοειδή και οι πρωτεΐνες (Martinez and Buschmann, 1996; Chopin and Wagey, 1999).

Το ίδιο ισχύει και για οργανισμούς, όπως τα επίφυτα, η υπερβολική ανάπτυξη των οποίων μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα και την απόδοση της παραγωγής. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές διαχείρισης. Τέτοιες τεχνικές περιλαμβάνουν την εφαρμογή γλυκού νερού, την έκθεση στον αέρα για παροχή οξυγόνου, τη χρήση χημικών ουσιών και

άλλες πρακτικές που έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως οι δεξαμενές και οι παράκτιες εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας (Buschmann et al., 1994; Fletcher, 1995).

Παραδείγματα αυτών των τεχνικών είναι η έκθεση των διχτύων καλλιέργειας *porphyra* στον αέρα κατά την άμπωτη ή με ειδικά σχεδιασμένα συστήματα εμφάνισης/βύθισης. Ωστόσο σε ανοιχτά θαλάσσια συστήματα η εφαρμογή αυτών των μεθόδων μπορεί να είναι δύσκολη, λόγω των φυσικών συνθηκών και των τεχνικών περιορισμών (Buschmann et al., 1997). Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε έντονη συσσώρευση μυδιών στο βένθος σε καλλιέργεια *Gracilaria* (κόκκινα φύκη), κοντά σε κλωβούς σολομού, η οποία οδήγησε σε απώλειες βιομάζας αυτών των φυκών, λόγω υπερφόρτωσης επιφύτων κατά την άνοιξη (Halling et al., 2005).

Τέτοια προβλήματα μπορούν να μετριαστούν μέσω στρατηγικών, όπως είναι η ταυτόχρονη καλλιέργεια φυκών. Έρευνα που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι, τα προβλήματα ρύπανσης σε εγκατάσταση εκτροφής σολομού περιορίστηκαν με την ταυτόχρονη καλλιέργεια φυκών, μέσω της μειωμένης ανάπτυξης επιφύτων στους ιχθυοκλωβούς (Chopin et al., 2004).

2.6 Φυσικές επιπτώσεις

Είναι γνωστό ότι τα παραγάδια, τα ξάρτια και τα δίχτυα των ιχθυοκλωβών μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές με φυσικό τρόπο, τόσο στην υδροδυναμική όσο και στο περιβάλλον. Οι εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την ταχύτητα και την κατεύθυνση του επιφανειακού ρεύματος, και να προκαλέσουν μείωση της ανανέωσης του νερού, ειδικά σε πιο κλειστές περιοχές (Bacher and Grant, 2001; Dingyong et al., 2015). Σύμφωνα με έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στον κόλπο Sanggou της Κίνας, διαπιστώθηκε ότι η υδατοκαλλιέργεια μείωσε τη μέση ταχύτητα των ρευμάτων κατά 40%, και ο μέσος χρόνος της ανανέωσης του νερού παρατάθηκε κατά 71% (Dingyong et al., 2015; Lin et al., 2016; Wartenberg et al., 2017). Οι φυσικές αλλαγές στο περιβάλλον μπορεί να είναι είτε θετικές είτε αρνητικές. Οι πλωτές κατασκευές που χρησιμοποιούνται στις υδατοκαλλιέργειες, συμβάλλουν στην αύξηση της βιομάζας των άγριων ψαριών και ενισχύουν τους πληθυσμούς των ενδημικών ειδών. Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις

υδατοκαλλιέργειας παρέχουν επιφάνειες (υποστρώματα) που ενδείκνυνται για την βιοαπόθεση μικροοργανισμών (biofouling). Αυτοί οι μικροοργανισμοί, όμως, βοηθούν στην επεξεργασία και απομάκρυνση των διαλυμένων θρεπτικών ουσιών και σωματιδιακών αποβλήτων, που προκύπτουν από την ιχθυοκαλλιέργεια, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της ποιότητας του νερού σε ορισμένες περιπτώσεις (Wartenberg et al., 2017).

2.7 Οικολογικές επιπτώσεις

Έρευνα στην Κίνα αναφέρει σοβαρές οικολογικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας, όπου τα συστήματα της υδατοκαλλιέργειας (ανοιχτά, ημίκλειστα), ειδικά σε μικρά βάθη έχουν μεταβάλει σημαντικά τις οικολογικές κοινότητες και τη δυναμική τους (Jiang et al., 2012; Han et al., 2013; Lu et al., 2015; Zhao et al., 2016). Οι επιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν κυρίως την εμφάνιση και εξάπλωση επιβλαβών φυκών (HABs), όπως μικροφύκη και μακροφύκη. Αυτή η έντονη εξάπλωση προκαλείται από την υψηλή συγκέντρωση θρεπτικών αλάτων (ευτροφισμός), τα οποία προέρχονται από τα απόβλητά των εγκαταστάσεων υδατοκαλλιέργειας (Wartenberg et al., 2017).

Η ανάπτυξη επιβλαβών μικροφυκών προκαλούν σημαντικές οικονομικές απώλειες στη βιομηχανία της υδατοκαλλιέργειας, εξαιτίας της μαζικής μείωσης των φυσικών αποθεμάτων ψαριών και άλλων θαλάσσιων οργανισμών. Σε ακραίες περιπτώσεις, μπορούν ακόμη να υποβαθμίσουν την ποιότητα του νερού, μειώνοντας την περιεκτικότητά του σε οξυγόνο κατά τη διάσπαση και την αποικοδόμηση των αποβλήτων τους, προκαλώντας μαζική θνησιμότητα σε άγριους πληθυσμούς ψαριών και άλλων ειδών (Wartenberg et al., 2017).

Η ανάπτυξη επιβλαβών μακροφυκών εμφανίζονται συχνά στη βόρεια Θάλασσα της Ανατολικής Κίνας και στην Κίτρινη Θάλασσα. Αυτά τα φύκη, όπως τα είδη *Ulva* και *Enteromorpha*, έχουν την ικανότητα να διανύουν τεράστιες αποστάσεις (π.χ., 40.000 km²), προκαλώντας οικονομικές ζημιές, καθώς συσσωρεύονται σε υδάτινες παράκτιες περιοχές. Τα είδη αυτά κατά την αποικοδόμησή τους μειώνουν σημαντικά τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου, προκαλώντας ασφυξία στους υδρόβιους οργανισμούς (Liu et al., 2009; Keesing et al., 2011; Liu et al., 2013).

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις μεδουσών σχετίζονται επίσης, με την εξάπλωση των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας. Οι εγκαταστάσεις των υδατοκαλλιεργειών προσφέρουν υπόστρωμα για την ανάπτυξη προνυμφών μεδουσών. Η αύξηση μεδουσών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις αλιευτικές και τουριστικές δραστηριότητες, καθώς δημιουργεί κινδύνους για τη δημόσια υγεία και τα θαλάσσια οικοσυστήματα (Dong et al., 2010).

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ IMTA

3.1 Πλεονεκτήματα

Στον κόλπο Sanggou της Κίνας, τα ολοκληρωμένα συστήματα πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας αποδείχθηκαν περισσότερο βιώσιμα και αποδοτικά συγκρινόμενα με τις μονοκαλλιέργειες (από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη). Η βιωσιμότητα των συστημάτων IMTA υποστηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα. Μπορούν να μεγιστοποιήσουν το οικονομικό όφελος, το οποίο ήταν 25,02 εκατομμύρια yuan/km², σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με αυτό των μονοκαλλιεργειών φυκών (15 εκατομμύρια yuan/km²) και χτενιών (13,23 εκατομμύρια yuan/km²) (Πιν. 1) (Shi et al., 2013).

Πίνακας 1: Ανάλυση κόστους οφέλους Μονοκαλλιέργειας – Πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (IMTAs).

	Μονοκαλλιέργεια φυκών	Μονοκαλλιέργεια χτενιών	Πολυκαλλιέργεια φυκών και χτενιών (IMTAs)
Οικονομικό όφελος (million yuan/km²)	15	13,23	25,02
Περιβαλλοντικό όφελος (million yuan/km²)	0,3	0,08	0,32
Συνολικό κόστος (million yuan/km²)	10,95	10,37	13,99
NPV (million yuan/km²)	4,35	2,93	11,35
BCR	1,04	1,28	1,81
RC (million yuan/km²)	6,09	3,75	20,54

Τα συστήματα IMTAs μπορούν να ενισχύσουν την ανακύκλωση της οργανικής ύλης και των θρεπτικών αλάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την καλλιέργεια φυκών, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιήσουν τα απόβλητα (άζωτο και φώσφορο) από τα εκτρεφόμενα είδη. Επίσης, η βιομάζα φυκών αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή τροφής, εμπλουτισμένη με πρωτεΐνες, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλα εκτρεφόμενα είδη, όπως είναι τα χτένια (Chopin et al., 2001). Τα χτένια μπορούν να προσλαμβάνουν τα φύκη, τα σωματιδιακά οργανικά υλικά, τα βακτήρια και άλλους μικροοργανισμούς (Shi et al., 2013). Στον κόλπο Sanggou, τα φύκη απορροφούν οργανικά και ανόργανα απόβλητα από τα χτένια σε συστήματα IMTA, επιβεβαιώνοντας ότι τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών. Αυτό συντελεί στη μείωση του συνολικού κόστους και λειτουργίας των συστημάτων IMTA (Πιν. 2). Για παράδειγμα, το συνολικό κόστος των IMTAs, που αντιστοιχεί στην εκτροφή φυκών και χτενιών, ανέρχεται σε 13,99 εκατομμύρια yuan/km², ενώ το συνολικό κόστος φυκών και χτενιών σε μονοκαλλιέργειες είναι $10,95 + 10,37 = 21,32$ εκατομμύρια yuan/km² (Πιν.2). Αυτό καταδεικνύει ότι η εκτροφή σε σύστημα IMTA είναι οικονομικά πιο αποδοτική σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας (δηλαδή, η ταυτόχρονη εκτροφή δύο ειδών είναι πιο προσοδοφόρα σε σχέση με την ξεχωριστή εκτροφή τους) (Shi et al., 2013).

Τα IMTAs έχουν τη δυνατότητα αφαίρεσης περισσότερων θρεπτικών σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Η αφαίρεση θρεπτικών αλάτων στα IMTAs φθάνει τους 202 Mt/km², ενώ στις μονοκαλλιέργειες φυκών και χτενιών είναι 193 και 49 Mt/km², αντίστοιχα, αποδεικνύοντας ότι η συνύπαρξη των δύο αυτών ειδών στα ολοκληρωμένα πολυτροφικά συστήματα υδατοκαλλιέργειών συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στον περιορισμό του ευτροφισμού. Τα φύκη μπορούν να λειτουργήσουν ως βιοφίλτρα που αντιμετωπίζουν τον ευτροφισμό, βελτιώνουν την υγεία, τη σταθερότητα των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και προάγουν την αειφόρο ανάπτυξή τους (Buschmann et al., 2001; Chopin et al., 2001; Troell et al., 2003; Fei, 2004; Neori et al., 2004; Kang et al., 2011). Για παράδειγμα, το *Gracilaria lemaneiformis* είναι ένα είδος φύκους που καλλιεργείται συνήθως στον κόλπο Sanggou, με μέγιστη απορρόφηση αμμωνίου και φωσφόρου στο 83,7% και 70,4%, αντίστοιχα (Mao et al., 2009). Ένα άλλο είδος φύκους, το *Lonicera japonica*, έδειξε επίσης υψηλή ικανότητα απορρόφησης θρεπτικών (Xu et al., 2011). Αυτά τα

Πίνακας 2: Κόστη υλοποίησης διαφορετικών μοντέλων εκτροφής στον κόλπο Sanggou της Κίνας.

	Μονοκαλλιέργεια φυκών	Μονοκαλλιέργεια χτενιών	Πολυκαλλιέργεια φυκών και χτενιών (IMTAs)
Συνολικό κόστος (million yuan/km²)	10,95	10,37	13,99
Μισθός και ημερομίσθια	55%	47,10%	38,44%
Απόσβεση	16%	39,54%	36,06%
Προμήθεια και εγκατάσταση νεαρών οργανισμών (Seeding)	19%	5,06%	18,77%
Απόθεμα	6%	4,82%	3,93%
Ενέργεια	2%	2,44%	1,99%
Συντήρηση	1%	0,60%	0,49%
Διάφορα	1%	0,44%	0,32%

παραδείγματα εξηγούν περαιτέρω, ότι τα συστήματα IMTAs είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον, αφού είναι ικανά να αφαιρούν περισσότερη ποσότητα θρεπτικών σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα (Shi et al., 2013).

Η μείωση των θρεπτικών έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, η οποία μειώνει σημαντικά τους οικονομικούς κινδύνους των επιχειρήσεων, που σχετίζονται με ασθένειες και θνησιμότητα. Λόγω αυτού του γεγονότος, στα IMTA συστήματα παρατηρείται περιορισμός της εξάπλωσης ασθενειών και μείωση της θνησιμότητας των χτενιών (Mao et al., 2009). Αντίθετα, στις μονοκαλλιέργειες, ένα μεμονωμένο περιστατικό ασθένειας μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για την παραγωγή και την οικονομική βιωσιμότητα της επιχείρησης.

Η ταυτόχρονη καλλιέργεια και εκτροφή φυκών και χτενιών (IMTAs) στον κόλπο Sanggou της Κίνας, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, υποδηλώνοντας ότι αποτελεί το πιο βιώσιμο μοντέλο υδατοκαλλιέργειας, τόσο από οικονομική όσο και από οικολογική άποψη (Shi et al, 2013).

3.2 Μειονεκτήματα

Τα συστήματα IMTA, παρ' όλα τα πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών, θέτουν και πολλές προκλήσεις και ανησυχίες, όπως:

- **Απαιτούν υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες:** Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας, τα συστήματα IMTA στην ανοιχτή θάλασσα απαιτούν υψηλότερη δαπάνη κεφαλαίου (Shinde et al., 2024).
- **Αποτελεσματική συνεργασία και συντονισμός:** Τα συστήματα IMTA για να αποδώσουν σωστά χρειάζεται να υπάρχει κατανόηση και συνεργασία από όλους τους εμπλεκόμενους, όπως ιχθυοκαλλιεργητές, μυδριοκαλλιεργητές, κτλ. (Shinde et al., 2024).

- **Απαίτηση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων:** Εξαιτίας της μεγάλης γεωγραφικής έκτασης που απαιτούν τα IMTAs, υπάρχει ο κίνδυνος ανταγωνισμού με άλλες παράκτιες ανθρώπινες δραστηριότητες, για την διεκδίκηση της εκμετάλλευσης της περιοχής (Shinde et al., 2024).
- **Κίνδυνος ασθενειών:** Η ταυτόχρονη καλλιέργεια και εκτροφή δύο και περισσότερων ειδών είναι πιο επιρρεπής σε μετάδοση ασθενειών από το ένα είδος στο άλλο, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ξενικά είδη (Stabili et al., 2010; Granada et al., 2016). Στην περίπτωση αυτή, η πιθανότητα κατάρρευσης του συστήματος είναι υψηλή, καθώς εξαρτάται από τις συμβιωτικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών ειδών (φυτά, ψάρια και ασπόνδυλα) (Chopin et al., 2017).
- **Απουσία θεσμοθετημένων κανονισμών:** Τα ολοκληρωμένα συστήματα πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας αποτελούν μια σχετικά νέα προσέγγιση, και πολλοί φορείς δεν έχουν ακόμη θεσπίσει σαφείς οδηγίες και κανονισμούς για τη διαχείριση και την εφαρμογή τους. Η απουσία κανονισμών και πρωτοκόλλων, καθιστά πολλές φορές δύσκολο τον έλεγχο του συστήματος σε επίπεδο λειτουργίας και ασφάλειας (Buck et al., 2018).
- Η εξαλίευση ορισμένων ειδών, όπως αυτή των ολοθούριων είναι ιδιαίτερα επίπονη, διότι απαιτεί καταδύσεις και συλλογή με το χέρι (Tolon et al., 2017; Kleitou et al., 2018). Αυτός είναι ένας από τους λόγους που τα περισσότερα συστήματα IMTA έχουν αναπτυχθεί στην Κίνα και σε άλλες ασιατικές χώρες όπου υπάρχει φτηνό εργατικό δυναμικό (Zamora et al., 2016).
- Υπάρχει σοβαρός κίνδυνος το σύστημα IMTA να οδηγηθεί σε υπερπληθυσμό των εκτρεφόμενων οργανισμών. Ο υπερπληθυσμός προκαλεί αυξημένα επίπεδα άγχους στα εκτρεφόμενα ψάρια και ευνοεί την ταχεία εξάπλωση ασθενειών και την υψηλή θνησιμότητα (Granada et al., 2016; Chopin et al., 2017).

- Γενικά, η κοινή γνώμη για την υδατοκαλλιέργεια τείνει να είναι αρνητική. Μολονότι τα ολοκληρωμένα συστήματα πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον σε σχέση με τα παραδοσιακά – συμβατικά συστήματα (μονοκαλλιέργειες), μπορεί να υποφέρουν από την ίδια κακή εικόνα και φήμη της υδατοκαλλιέργειας (Osmundsen et al., 2017).

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να αυξηθεί κατά 30%, σε 10 δισεκατομμύρια ανθρώπους μέχρι το 2050. Η διατήρηση αυτού του αυξανόμενου πληθυσμού θα απαιτήσει ανάλογη αύξηση της παραγωγής τροφίμων, μέσω της γεωργίας, της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας. Παρόλο που οι τεχνολογικές εξελίξεις θα συνεχίσουν να βελτιώνουν την παραγωγή, την ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων, τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα φυσικά όρια της διαθέσιμης γης για εκμετάλλευση ενδέχεται να περιορίσουν σημαντικά την περαιτέρω αύξηση της παραγωγής. Επιπλέον προβλήματα ενδέχεται να προκύψουν λόγω της αυξημένης ζήτησης για τους ήδη περιορισμένους υδάτινους πόρους, εξαιτίας τόσο της πληθυσμιακής αύξησης όσο και την ύπαρξη άλλων ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων. Δεδομένου ότι πάνω από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, η μεγαλύτερη προοπτική για αύξηση της παραγωγής τροφίμων βρίσκεται στη βελτίωση της υδατοκαλλιέργειας, η οποία μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή ψαριών, οστρακοειδών και υδρόβιων φυτών. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμη πιο επιτακτική, λόγω της αυξανόμενης πίεσης που δέχονται τα φυσικά ιχθυαποθέματα. Η ζήτηση για θαλασσινά αναμένεται να υπερδιπλασιαστεί έως το 2050, με ρυθμό αύξησης που ξεπερνά κατά πολύ τον ρυθμό αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού. Η υδατοκαλλιέργεια επομένως, θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή τροφής για το μέλλον (Noakes et al., 2018).

Ωστόσο, πολλά προβλήματα προκύπτουν κατά την ανάπτυξη των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας, όπως η συχνή εμφάνιση ασθενειών, η ρύπανση του περιβάλλοντος, η απώλεια της βιοποικιλότητας και οι αυξανόμενοι κίνδυνοι για την ασφάλεια των τροφίμων, πιθανώς λόγω των συμβατικών συστημάτων (μονοκαλλιέργειες) που μπορούν να επιβαρύνουν το περιβάλλον με θρεπτικά και να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση των οικοσυστημάτων και μειωμένη αντοχή των εκτρεφόμενων οργανισμών στις ασθένειες (Shi et al., 2013).

Τα ολοκληρωμένα πολυτροφικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας (IMTAs) φαίνεται να έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα συγκρινόμενα με την συμβατική εκτροφή ψαριών και θαλασσινών, ενώ συνεχίζουν να παρέχουν μεγάλα περιθώρια κέρδους. Προσφέρουν πολλαπλά οφέλη, τόσο περιβαλλοντικά όσο και

οικονομικά, καθιστώντας τα μια βιώσιμη λύση για τη σύγχρονη υδατοκαλλιέργεια. Περιβαλλοντικά, συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης, μέσω της αξιοποίησης των αποβλήτων, με τα απόβλητα του ενός είδους να αποτελούν τροφή για άλλα είδη, μειώνοντας έτσι το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εκτροφής (Chopin et al., 2012). Τα φύκη και τα δίθυρα, για παράδειγμα, απορροφούν και αξιοποιούν τα θρεπτικά που εκλύονται από τις εγκαταστάσεις των ιχθυοκαλλιεργειών, περιορίζοντας το φαινόμενο του ευτροφισμού (Neori et al., 2004). Οικονομικά, τα συστήματα αυτά προσφέρουν στους παραγωγούς πολλαπλές πηγές εσόδων, καθώς επιτρέπουν την ταυτόχρονη εκμετάλλευση τόσο ιχθύων όσο και άλλων εμπορεύσιμων ειδών, όπως φύκη και οστρακοειδή (Knowler et al., 2020). Επιπλέον, η υιοθέτησή τους μειώνει την ανάγκη για επιπλέον πόρους, όπως λιπάσματα και πρόσθετες ιχθυοτροφές, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος παραγωγής (Abreu et al., 2011). Τέλος, η αυξημένη βιοποικιλότητα που προκύπτει από αυτά τα συστήματα, συμβάλλει στη σταθερότητα των οικοσυστημάτων, καθιστώντας τα IMTAs μια ολοκληρωμένη, αειφόρο και αποδοτική στρατηγική για την ανάπτυξη της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας.

Η Κίνα, η οποία εξακολουθεί μέχρι και σήμερα να είναι πρωτοπόρος στη θαλάσσια υδατοκαλλιέργεια, αποτελεί το πιο επιτυχημένο παράδειγμα εφαρμογής αυτών των συστημάτων, ενσωματώνοντάς τα σε παράκτιες περιοχές με αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα (Wartenberg et al., 2017). Οι εγκαταστάσεις των IMTAs στη χώρα όχι μόνο έχουν βελτιώσει τις περιβαλλοντικές συνθήκες της θάλασσας, αλλά έχουν επιτύχει και υψηλή παραγωγικότητα, προσφέροντας μια ξεκάθαρη απόδειξη της αποδοτικότητας αυτής της μεθόδου. Ειδικά στον κόλπο Sanggou, η χρήση των IMTAs έχει αποδειχθεί πρωτοποριακή, με τα φύκη και τα δίθυρα να παίζουν κεντρικό ρόλο στη μείωση των θρεπτικών και την ενίσχυση της συνολικής βιοποικιλότητας (Shi et al., 2013). Ο Καναδάς επίσης, έχει κάνει μεγάλα βήματα για την ανάπτυξη των συστημάτων IMTA, στρέφοντας ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον του προς τις βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας (Noakes et al., 2018). Στην Ευρώπη τα IMTAs παρά τις πιλοτικές δοκιμές και τις προσπάθειες που γίνονται εξακολουθούν να μην είναι τόσο αναπτυγμένα μολονότι προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα και ταυτίζονται πλήρως με τη στρατηγική της ΕΕ για τη γαλάζια ανάπτυξη (Laktuka et al., 2023).

Η σημασία της βιώσιμης ανάπτυξης των παράκτιων οικοσυστημάτων χρειάζεται να αποτελεί βασική προτεραιότητα της σύγχρονης υδατοκαλλιέργειας. Για να

ενσωματωθεί η υδατοκαλλιέργεια στα παράκτια οικοσυστήματα, είναι απαραίτητο να υπάρχει σαφής κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστημάτων παραγωγής και του περιβάλλοντος. Παρ' ό,τι η έρευνα έχει ήδη αναδείξει τα σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη των IMTA συστημάτων, οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εκτρεφόμενων και των καλλιεργούμενων ειδών καθιστούν τη διαχείριση μεγάλων εγκαταστάσεων ιδιαίτερα απαιτητική και δύσκολη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη γνώση και την απουσία θεσμοθετημένων κανόνων και πρωτοκόλλων, σχετικά με το πώς λειτουργούν τα συστήματα αυτά (Fang et al., 2016).

Η αποτελεσματική εφαρμογή των IMTAs μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά οφέλη, τόσο για το περιβάλλον όσο και για τις τοπικές κοινωνίες. Τα συστήματα αυτά μπορούν να δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας, να ενισχύσουν τις τοπικές οικονομίες και να προωθήσουν την περιβαλλοντική συνείδηση. Ταυτόχρονα, η παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας και μεγάλης ζήτησης, όπως τα φύκη, τα μύδια και άλλα θαλασσινά, μπορεί να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα των παραγωγών στις διεθνείς αγορές.

Για να μπορέσουν όμως τα IMTAs να αξιοποιηθούν πλήρως, είναι απαραίτητο να υπάρξει συντονισμένη δράση σε πολλά επίπεδα. Οι κυβερνήσεις οφείλουν να επενδύσουν στη δημιουργία υποδομών, να προσφέρουν οικονομικά κίνητρα στους παραγωγούς και να προωθήσουν την έρευνα και την καινοτομία. Παράλληλα, η επιστημονική κοινότητα έχει καθοριστικό ρόλο στην έρευνα των βιολογικών και οικονομικών παραμέτρων αυτών των συστημάτων, ώστε να διασφαλιστεί η μέγιστη απόδοσή τους. Επιπλέον, η εκπαίδευση και η ενημέρωση των παραγωγών και του ευρύτερου κοινού είναι ζωτικής σημασίας. Μέσω εκπαιδευτικών προγραμμάτων και εκστρατειών ευαισθητοποίησης και ενημέρωσης, μπορούν να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα των IMTAs, ώστε να καλλιεργηθεί η αποδοχή τους ως βιώσιμη λύση για τη σύγχρονη υδατοκαλλιέργεια. Τέλος, η διεθνής συνεργασία μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την προώθηση αυτής της προσέγγισης. Η ανταλλαγή γνώσεων και βέλτιστων πρακτικών μεταξύ χωρών που έχουν ήδη εφαρμόσει τα IMTAs, και εκείνων που βρίσκονται στα πρώτα στάδια της υιοθέτησής τους, μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία εφαρμογής. Επιπλέον, η συμμετοχή σε διεθνείς πρωτοβουλίες και οργανισμούς μπορεί να προσφέρει πρόσβαση σε χρηματοδότηση και τεχνογνωσία.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abreu H., Varela D., Henríquez-Antipa L., Villarroel A., Yarish C., Pinto I.S., Buschmann A.H. (2009). Traditional vs. integrated aquaculture of *Gracilaria chilensis* C.J. Bird, McLachlan et E.C. Oliveira: Productivity and physiological performance. *Aquaculture*, 293(3): 211-220.
- Aguilo-Arce J., Ferriol P., Trani R., Puthod P., Pierri C., Longo C. (2023). Sponges as Emerging By-Product of Integrated Multitrophic Aquaculture (IMTA). *Journal of Marine Science and Engineering*, 11: 80.
- Armstrong S.M., Hargrave B.T., Haya K. (2005). Antibiotic Use in Finfish Aquaculture: Modes of Action, Environmental Fate, and Microbial Resistance. *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture*: 341-357.
- Avnimelech Y. (2009). Biofloc technology. A practical guide book. The World Aquaculture Society. *Aquaculture*, 176: 227–235.
- Bacher C., Grant J. (2001). A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58: 1003-1011.
- Barrington K., Chopin T, Robinson S.M.C. (2009). Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. *FAO Fish Aquaculture Technical Paper*, 529: 7-46.
- Buck B.H., Troell M.F., Krause G., Angel D.L., Grote B., Chopin T. (2018). State of the Art and Challenges for Offshore Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). *Marine Fisheries, Aquaculture and Living Resources*, 5: 165.
- Burridge L., Weis J., Cabello F., Pizarro J., Bostick K. (2010). Chemical use in salmon aquaculture: A review of current practices and possible environmental effects. *Aquaculture*, 306(1-4): 7-23.
- Buschmann A.H., Mora O.A., Gomez P., Bottger M., Buitanos S., Retamales C., Vergara P.A., Gutierrez A. (1994). *Racilaria chilensis* outdoor tank cultivation in Chile: Use of land-based salmon culture effluents. *Aquacultural Engineering*, 13: 283-300.
- Buschmann A.H., Retamales C.A., Figueroa C. (1997). Ceramialean epiphytism in an intertidal *Gracilaria chilensis* (*Rhodophyta*) bed in southern Chile. *Journal of Applied Phycology*, 9: 129–135.
- Buschmann A.H., Troell M., Kautsky N. (2001). Integrated algal farming: A review. *Cahiers de Biologie Marine*, 42(1): 83-90.
- Buschmann A.H., Varela D.A., Hernandez-Gonzalez M.C., Huovinen P. (2008). Opportunities and challenges for the development of an integrated seaweed-based

aquaculture activity in Chile: determining the physiological capabilities of *Macrocystis* and *Gracilaria* as biofilters. *Journal of Applied Phycology*, 20: 571-577.

Cabello F., Godfrey H.P., Tomova A., Ivanova L., Dölz H., Millanao A., Buschmann A.H. (2013). Antimicrobial use in aquaculture re-examined: its relevance to antimicrobial resistance and to animal and human health. *Environmental Microbiology*, 15(7): 1917-1942.

Checa D., Macey B., Bolton J.J., Brink-Hull M., O'Donohoe P., Cardozo A., Poersch L.H., Sanchez I. (2024). Circularity Assessment in Aquaculture: The Case of Integrated Multi-Trophic Aquaculture Systems. *Fishes*, 9(5): 165.

Chopin T., Buschmann A.H., Halling C., Troell M., Kautsky N., Neori A., Kraemer G.P., Zertuche J., Yarish C., Neefus C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6): 975–986.

Chopin T. (2017). Challenges of moving Integrated Multi-Trophic Aquaculture along the R&D and commercialization continuum in the western world. *Journal of Ocean Technology*, 12(2): 34-47.

Chopin T., Cooper J.A., Reid G.K., Cross S.f., Moore C. (2012). Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 4: 209–220.

Chopin T., MacDonald B., Robinson S.M.C., Cross S.F., Pearce C., Knowler D., Noce A., Reid G.K., Cooper J.A., Speare D., Burridge L., Crawford L., Sawhney M., Ang K.P., Backman C., Hutchinson M. (2013). The Canadian Integrated Multi-Trophic Aquaculture Network (CIMTAN)—A Network for a Ecosystem Responsible Aquaculture. *Fisheries*, 38(7): 297-308.

Chopin T., Robinson S.M.C., Sawhney M., Bastarache S., Belyea E., Shea R., Armstrong W., Fitzgerald P. (2004). The AquaNet integrated multi-trophic aquaculture project: Rationale of the project and development of kelp cultivation as the inorganic extractive component of the system. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada*, 104(3): 11-18.

Chopin T., Wagey B. (1999). Factorial Study of the Effects of Phosphorus and Nitrogen Enrichments on Nutrient and Carrageenan Content in *Chondrus crispus* (*Rhodophyceae*) and on Residual Nutrient Concentration in Seawater. *Botanica Marina*, 42(1): 23-31.

Cole D.W., Cole R., Gaydos S.J., Gray J., Hyland G., Jacques M.L., Powell-Dunford N., Sawhney C., Au W.W. (2009). Aquaculture: Environmental, toxicological, and health issues. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 212(4): 369-377.

Crab R., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356–357: 351-356.

Defoirdt T., Sorgeloos P., Bossier P. (2011). Alternatives to antibiotics for the control of bacterial disease in aquaculture. *Current Opinion in Microbiology*, 14(3): 251-258.

- Dingyong Z., Huang D., Xudong Q., He Y., Zhang T. (2015). Effect of suspended kelp culture on water exchange as estimated by in situ current measurement in Sanggou Bay, China. *Journal of Marine Systems*, 149: 14-24.
- Dong Z., Liu D., Keesing J.K. (2010). Jellyfish blooms in China: Dominant species, causes and consequences. *Marine Pollution Bulletin*, 60(7): 954-963.
- Fang J.G., Zhang J., Xiao T., Huang D., Liu S. (2016). integrated multi-trophic aquaculture in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 8: 201–205.
- FAO (2016). Contributing to Food Security and Nutrition for All. The State of World Fisheries and Aquaculture.
- FAO (2012). Improving biosecurity through prudent and responsible use of veterinary medicines in aquatic food production.
- FAO (2018). Meeting the sustainable development goals. THE STATE OF THE WORLD.
- FAO (2005). Responsible use of antibiotics in aquaculture.
- Fei X. (2004). Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation. *Hydrobiologia*, 512(1): 145-151.
- Fletcher R.L. (1995). Epiphytism and fouling in *Gracilaria* cultivation: an overview. *Journal of Applied Phycology*, 7: 325–333.
- Gaona C.A.P., Poersch L.H., Krummenauer D., Foes G., Wasielesky W. (2011). The Effect of Solids Removal on Water Quality, Growth and Survival of *Litopenaeus vannamei* in a Biofloc Technology Culture System. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 12(1): 54-73.
- Gaona C.A.P., Serra F.da.P., Furtado P.S., Poersch L.H., Wasielesky W. (2016). Effect of different total suspended solids concentrations on the growth performance of *Litopenaeus vannamei* in a BFT system. *Aquacultural Engineering*, 72(4): 65-69.
- Gaona C.A.P., Souza de Almeida M., Viau V.E., Poersch L.H., Wasielesky W. (2015). Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation. *Aquaculture Research*, 48(3): 1-10.
- Gökalp M., Nederlof M., Zhao H., De Goeij J.M., Osigna R. (2020). The potential roles of sponges in integrated mariculture. *REVIEWS IN Aquaculture*, 13(3): 1159–1171.
- Granada L., Sousa N., Lopes M.S., Lemos M.F.L. (2016). Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors major challenges? –a review. *Reviews in Aquaculture*, 8(3): 283-300.
- Halling C., Aroca G., Cifuentes M., Buschmann A.H., Troell M. (2005). Comparison of Spore Inoculated and Vegetative Propagated Cultivation Methods of *Gracilaria chilensis* in an Integrated Seaweed and Fish Cage Culture. *Aquaculture International*, 13(5): 409–422.

- Han Q., Wang Y., Zhang Y., Keesing J., Liu D. (2013). Effects of intensive scallop mariculture on macrobenthic assemblages in Sishili Bay, the northern Yellow Sea of China. *Hydrobiologia*, 718(1): 1-15.
- Harrison P.J., Hurd C. (2001). Nutrient physiology of seaweeds: Application of concepts to aquaculture. *Cahiers de Biologie Marine*, 42(1): 71-82.
- Jiang Z., Chen Q.Z., Jiangning Z., Liao Y., Shou L., Liu J. (2012). Phytoplankton community distribution in relation to environmental parameters in three aquaculture systems in a Chinese subtropical eutrophic bay. *Marine Ecology Progress Series*, 446: 73– 89.
- Kang Y.H., Park S.R., Chung I.K. (2011). Biofiltration efficiency and biochemical composition of three seaweed species cultivated in a fish-seaweed integrated culture. *Algae*, 26(1): 97-108.
- Keesing J.K., Liu D., Fearn P., Garcia R. (2011). Inter- and intra-annual patterns of *Ulva prolifera* green tides in the Yellow Sea during 2007–2009, their origin and relationship to the expansion of coastal seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin*, 62(6): 1169-1182.
- Khanjani M.H., Zahedi S., Mohammadi A. (2022). Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species and application of biofloc technology (BFT). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45): 67513–67531.
- Kleitou P., Kletou D., David J. (2018). Is Europe ready for integrated multi-trophic aquaculture? A survey on the perspectives of European farmers and scientists with IMTA experience. *Aquaculture*, 490: 136-148.
- Knowler D., Chopin T., Martinez-Espineira R., Neori A., Nobre A.M., Noce A., Reid G.K. (2020). The economics of Integrated Multi-Trophic Aquaculture: where are we now and where do we need to go? *Reviews in Aquaculture*(12): 1579–1594.
- Kummerer K. (2004). Resistance in the environment. *Journal of Antimicrobial*, 54(2): 311–320.
- Kümmerer K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I. *Chemosphere*, 75(4): 417-434.
- Kümmerer K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – a review – Part II. *Chemosphere*, 75(4): 435–441.
- Laktuka K., Kalnbalkīte A., Sniega L., Logins K., Lauka D. (2023). Towards the Sustainable Intensification of Aquaculture: Exploring Possible Ways Forward. *Sustainability*, 15(24): 1-26.
- Lalumera M.G., Calamari D., Galli P., Castiglioni S., Crosa G., Fanelli R. (2004). Preliminary investigation on the environmental occurrence and effects of antibiotics used in aquaculture in Italy. *Chemosphere*, 54(5): 661-668.

- Largo D.B., Diola A.G., Marababol M.S. (2016). Development of an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system for tropical marine species in southern cebu, CentralPhilippines. *Aquaculture Reports*, 3: 67-76.
- Leston S., Nunes M., Viegas I., Ramos F., Pardal M.A. (2013). The effects of chloramphenicol on *Ulva lactuca*. *Chemosphere*, 91(4): 552-557.
- Lin J., Li C., Zhang S. (2016). Hydrodynamic effect of a large offshore mussel suspended aquaculture farm. *Aquaculture*, 451: 147-155.
- Liu D., Keesing J., He P., Wang Z., Shi Y., Wang Y. (2013). The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: Formation and implications. *Estuarine, Coast and Shelf Science*, 129: 2-10.
- Liu D., Keesing J., Xing Q., Shi P. (2009). World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin*, 58(6): 888-895.
- Lu J. Huang L., Xiao T., Jiang Z., Zhang W. (2015). The effects of Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) on the microbial food web in a phosphorus-deficient mariculture system in Sanggou Bay, China. *Aquaculture*, 448: 341-349.
- Lulijwa R., Rupia E.J., Alfaro A.C. (2019). Antibiotic use in aquaculture, policies and regulation, health and environmental risks: a review of the top 15 major producers. *Reviews in Aquaculture*, 12(2): 1-24.
- Mao Y., Yang H., Zhou Y., Ye N., Fang J. (2009). Potential of the seaweed *Gracilaria lamniform* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in North China. *Journal of Applied Phycology*, 21(6): 649-656.
- Martinez L.A., Buschmann A.H. (1996). Agar yield and quality of *Gracilaria chilensis* (Gigartinales, Rhodophyta) in tank culture using fish effluents. *Hydrobiologia*, 326(327): 341-345.
- Näsström L. (2020). Concerning the Viability of Offshore Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA), and the Possibility for its Optimization. SJÄLVSTÄNDIGT ARBETE I MARINBIOLOGI, Dissertation.
- Neofitou N., Klaoudatos S. (2008). Effect of fish farming on the water column nutrient concentration in a semi-enclosed gulf of the Eastern Mediterranean. *Aquaculture Research*, 39:482-490.
- Neofitou N., Lolas A., Ballios I., Skordas K., Tziantziou L., Vafidis D. (2019). Contribution of sea cucumber *Holothuria tubulosa* on organic load reduction from fish farming operation. *Aquaculture*, 501: 97-103.
- Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A.H., Kraemer G.P., Halling C., Shpigel M., Yarish C. (2004). Integrated aquaculture: Rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231(1-4): 361-391.
- Ning Z., Liu S.M., Zhang G., Ning X., Li R., Jiang Z., Fang J., Zhang J. (2016). Impacts of an integrated multi-trophic aquaculture system on benthic nutrient fluxes: a case study in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 8: 221-232.

- Noakes D.J. (2018). Oceans of opportunity: a review of Canadian aquaculture. *Marine Economics and Management*. Emerald Group, 1(1): 43-54.
- Osmundsen T.C., Olsen M.S. (2017). The imperishable controversy over aquaculture. *Marine Policy*, 76: 136-142.
- Pietrak M., Molloy S.D., Bouchard D.A., Singer J.T., Bricknell I. (2012). Potential role of *Mytilus edulis* in modulating the infectious pressure of *Vibrio anguillarum* 02B on an integrated multi-trophic aquaculture farm. *Aquaculture*, 326–329: 36–39.
- Ray A.J., Lewis B.L., Browdy C.L., Leffler J.W. (2010). Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems. *Aquaculture*, 299(1-4): 89-98.
- Rosa J., Lemos M.F.L., Crespo D., Nunes M., Freitas A., Ramos F., Pardal M.A., Leston S. (2020). Integrated multitrophic aquaculture systems – Potential risks for food safety. *Trends in Food Science & Technology*, 96: 79-90.
- Samocha T.M., Patnaik S., Speed M., Ali A., Burger J.M., Almeida R.V., Ayub Z., Harristanto M., Horowitz A., Brock D.L. (2007). Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering*, 36(2): 184-191.
- Sapkota A., Sapkota A.R., Kucharski M., Burke J., McKenzie S., Walker P., Lawrence R. (2008). Aquaculture practices and potential human health risks: current knowledge and future priorities. *Environment International*, 34(8): 1215-1226.
- Sasikumar G, Viji C.S. (2016). Integrated multitrophic aquaculture systems (IMTA). Winter School on Technological Advances in Mariculture for Production Enhancement and Sustainability, Course Manual. Indian Council of Agricultural Research: 47-55.
- Shi H., Zheng W., Zhang X., Zhu M., Ding D. (2013). Ecological–economic assessment of monoculture and integrated multi-trophic aquaculture in Sanggou Bay of China. *Aquaculture*, 410-411: 172- 178.
- Shinde S. V. (2024). IMTA: Elevating Nutrient Extraction for Sustainable Nutrifcation. *Chronicle of Aquatic Science*, 1(9): 43-51.
- Stabili L., Schirosi R., Licciano M., Mola E., Giangrande A. (2010). Bioremediation of bacteria in aquaculture waste using the polychaete *Sabella spallanzanii*. *New Biotechnology*, 27(6): 774-781.
- Stanley M. (2019). Intelligent Management Systems for Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMPAQT). Scottish Association for Marine Science. European Commission, HORIZON 2020.
- Tolon M.T., Emiroglu D., Gunay D., Ozgul A. (2017). Sea cucumber (*Holothuria tubulosa* Gmelin, 1790) culture under marine fish net cages for potential use in integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, (46): 749-756.

- Troell M., Halling C., Nilsson A., Buschmann A.H., Kautsky N., Kautsky L. (1997). Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariiales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture*, 156(1-2): 45-61.
- Troell M., Halling C., Neori A., Chopin T., Buschmann A.H., Kautsky N., Yarish C. (2003). Integrated Mariculture: Asking The Right Questions. *Aquaculture*, 226(1-4): 69-90.
- Troell M., Joyce A., Chopin T., Neori A., Buschmann A.H., Fang J.G. (2009). Ecological engineering in aquaculture Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture* 297(1): 1-9.
- Tuševljak N., Dutil L., Rajić A., Uhlan C., McClure C., St-Hilaire S., Reid-Smith R.J., McEwen S.A. (2012). Antimicrobial Use and Resistance in Aquaculture: Findings of a Globally Administered Survey of Aquaculture-Allied Professionals. *Zoonoses and Public Health*, 60(6): 426–436.
- Van de Grootevheen T., Havinga M., Hoefsloot M., Oliveira Bismarck de Melo G., Andrea Sebastiano Tribulato A., Valé, B. (2021). Aquaculture systems inside of the energy storage lake, special interest in integrated multitrophic aquaculture.
- Vijayaram S., Ringoe E., Ghafarifarsani H., Hoseinifar S.H., Ahani S., Chou C.C. (2024). Use of Algae in Aquaculture: A Review. *Fishes*, 9(63): 1-21.
- Viji C.S. (2015). Studies on integrated multi-trophic aquaculture in a tropical estuarine system in Kerala, India. Ph.D. Thesis, Central Institute of Fisheries Education, Mumbai: 128.
- Wartenberg R., Feng L., Wu J., Mak Y.L., Chan L.L., Telfer T., Lam P.K.S. (2017). The impacts of suspended mariculture on coastal zones in China and the scope for Integrated Multi-Trophic Aquaculture. *Ecosystem Health and Sustainability*, 3(6): 1-20.
- Xu D., Gao Z., Zhang X., Qi Z., Meng C., Zhuang Z., Ye N. (2011). Evaluation of the potential role of the macroalga *Laminaria japonica* for alleviating coastal eutrophication. *Bioresource Technology*, 102(21): 9912-8.
- Zamora L. N., Yuan X., Carton A.G., Slater M.J. (2016). Role of deposit-feeding sea cucumbers in integrated multitrophic aquaculture: progress, problems, potential and future challenges. *Reviews in Aquaculture*, 10(1): 57–74.
- Zhao L., Zhao Y., Xu J., Zhang W., Huang Z., Jiang Z., Feng J., Xiao T. (2016). Distribution and seasonal variation of picoplankton in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 8: 261-271.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://www.globalseafood.org/advocate/look-at-integrated-multi-trophic-aquaculture/>. (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://umaine.edu/cooperative-aquaculture/integrated-multi-trophicaquaculture/>. (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://www.globalseafood.org/advocate/conscious-coupling-can-imta-gain-a-foothold-in-europe/> (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/120/παραγωγή-υδατοκαλλιέργειας-στην-ευρωπαϊκή-ένωση> (Πρόσβαση: 03-02-25)

https://www.flickr.com/photos/artour_a/2875855754/galleries/ (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://static.inaturalist.org/photos/90227656/large.jpg> (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://marinebiodiversity.org.bd/species/penaeus-merguiensis/> (Πρόσβαση: 03-02-25)

<https://thefishsite.com/articles/soaking-up-the-benefits-of-sea-sponge-aquaculture> (Πρόσβαση: 03-02-25)

ABSTRACT

This thesis explores Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) systems, an innovative approach that combines the cultivation of species from different trophic levels to create a sustainable system that minimizes environmental waste and enhances productivity. Unlike traditional aquaculture, where organic and inorganic waste accumulation can lead to environmental degradation, IMTA utilizes these by-products as nutrients for other species, helping to reduce eutrophication and improve water quality.

The study presents the key ecological, social, and economic advantages of IMTA systems. It highlights successful case studies from countries such as China and Canada, where IMTA has contributed to sustainable water resource management. China, with its long history of polyculture aquaculture, has developed large-scale IMTA facilities, while Canada has invested in research and technological advancements to promote sustainable food production. In Europe, IMTA systems remain at a pilot stage, as technical, regulatory, and economic challenges hinder their large-scale adoption.

The research emphasizes IMTA's potential in enhancing biodiversity, promoting innovative management practices, and strengthening local economies. It also examines environmental risks, such as pathogen accumulation and species interactions, and proposes strategies to mitigate them.

Finally, the thesis underscores the need for further research, education, and policy development to support the sustainable adoption of IMTA systems. Transitioning to more sustainable aquaculture practices is a critical priority for global food security and the preservation of aquatic ecosystems.