

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας από την άποψη της υπερθέρμανσης του πλανήτη

Καθηγήτρια Vlasta Bartulović, PhD

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια. Tatjana Dobrosłavić, PhD

Πανεπιστήμιο του Ντουμπρόβνικ

Εισαγωγή

Εν όψει της κλιματικής αλλαγής, ο αντίκτυπος της υδατοκαλλιέργειας στο περιβάλλον αποτελεί αυξανόμενη ανησυχία, καθώς ο κλάδος συμβάλλει στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, στην καταστροφή των οικοτόπων και στην εξάντληση των πόρων. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), του μεθανίου (CH_4), του οξειδίου του αζώτου (N_2O) και των φθοριούχων αερίων, συμβάλλουν σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη, καθώς παγιδεύουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα της Γης. Ενώ το CO_2 βρίσκεται συχνά στο επίκεντρο, το CH_4 είναι ένα εξαιρετικά ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου, οι αυξημένες εκπομπές του οποίου οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η αποψίλωση των δασών, η εξόρυξη, η καύση βιομάζας και οι βιομηχανικές διεργασίες (Wróbel et al., 2023). Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) έχει τονίσει ότι ο ανθρώπινος αντίκτυπος στην κλιματική αλλαγή είναι αδιαμφισβήτητος, καθώς η εκβιομηχάνιση και η αστικοποίηση οδηγούν σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σημειώνουν ρεκόρ. Οι τομείς των μεταφορών, της ενέργειας και της γεωργίας εξακολουθούν να συμβάλλουν σημαντικά στην κλιματική αλλαγή, επηρεάζοντας τα καιρικά φαινόμενα, τη στάθμη της θάλασσας και τη βιοποικιλότητα.

Ενώ η παγκόσμια βιομηχανία υδατοκαλλιέργειας είναι απαραίτητη για την επισιτιστική ασφάλεια, αποτελεί επίσης σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι ενεργοβόρες λειτουργίες, η αλλαγή χρήσης γης, η παραγωγή ζωοτροφών και η διαχείριση αποβλήτων συμβάλλουν στο αποτύπωμα άνθρακα της (MacLeod et al., 2019). Πολλές εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που αυξάνει τις εκπομπές CO_2 , ιδίως σε περιοχές όπου ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο κυριαρχούν στην παραγωγή ενέργειας (Bujas et al., 2022). Επιπλέον, η ταχεία επέκταση του κλάδου έχει οδηγήσει στη

μετατροπή ενδαιτημάτων, ιδίως σε οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, όπως τα μαγκρόβια και οι υγρότοποι, συμβάλλοντας στην απώλεια βιοποικιλότητας και στην υποβάθμιση των οικοσυστημάτων (Barbier et al., 2011).

Μία από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας είναι η παραγωγή ζωοτροφών, η οποία αντιπροσωπεύει έως και το 90 % των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις ιχθυοκαλλιέργειες (FAO, 2022). Η καλλιέργεια ζωοτροφών, συμπεριλαμβανομένων των ιχθυαλεύρων και των φυτικών συστατικών, απαιτεί μεγάλη έκταση γης, νερού και ενέργειας, γεγονός που επιδεινώνει περαιτέρω τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Επιπλέον, η υδατοκαλλιέργεια παράγει σημαντικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των μη φαγωμένων ζωοτροφών, των περιττωμάτων, των μεταβολικών υποπροϊόντων και των χημικών υπολειμμάτων, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των υδάτων και να διαταράξουν τα υδάτινα οικοσυστήματα (Wu, 1995; Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Holmer et al., 2008). Η έκταση αυτών των επιπτώσεων ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία της εκμετάλλευσης, τα καλλιεργούμενα είδη, την πυκνότητα του ζωικού κεφαλαίου και την αποδοτικότητα των ζωοτροφών. Καθώς η παγκόσμια ζήτηση για θαλασσινά συνεχίζει να αυξάνεται, αποτελεί επείγουσα πρόκληση να συμβιβαστεί η ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Οι βιώσιμες πρακτικές στη χρήση ενέργειας, τη διαχείριση της γης, την παραγωγή ζωοτροφών και την επεξεργασία αποβλήτων είναι απαραίτητες για την ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος άνθρακα του κλάδου και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

1. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) επηρεάζουν σημαντικά την ατμόσφαιρα της Γης, καθώς παγιδεύουν θερμότητα. Τα αέρια αυτά περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και τα φθοριούχα αέρια. Ενώ το CO₂ συζητείται συχνά, το CH₄ διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η μετατροπή υγροτόπων, η υγειονομική ταφή, η κατασκευή φραγμάτων, η καύση βιομάζας, η αποψίλωση των δασών, η εξόρυξη και οι βιομηχανίες φυσικού αερίου και άνθρακα έχουν αυξήσει δραστικά τις εκπομπές CH₄. Παρά τη μικρότερη ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής του, το CH₄ είναι πολύ πιο αποτελεσματικός αποδέκτης θερμότητας από το CO₂ (United Nations Environment Programme, 2022). Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) αναφέρει ότι "η ανθρώπινη επίδραση στο κλιματικό σύστημα είναι σαφής και οι πρόσφατες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι οι υψηλότερες στην ιστορία". Οι ανθρώπινες δραστηριότητες από τη βιομηχανική επανάσταση και μετά έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις αυτών των αερίων, οδηγώντας σε αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας και σε επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η ταχεία εκβιομηχάνιση και αστικοποίηση πολλών περιοχών έχουν επιδεινώσει περαιτέρω τα επίπεδα εκπομπών. Ο τομέας των μεταφορών, η παραγωγή ενέργειας και οι βιομηχανικές διεργασίες συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές CO₂. Επιπλέον, ο γεωργικός τομέας, συμπεριλαμβανομένης της κτηνοτροφίας και

των ορυζώνων, αποτελεί αξιοσημείωτη πηγή εκπομπών CH_4 και N_2O . Οι εκπομπές αυτές έχουν εκτεταμένες συνέπειες, επηρεάζοντας τα καιρικά φαινόμενα, τη στάθμη της θάλασσας και τη βιοποικιλότητα. Η παγκόσμια βιομηχανία υδατοκαλλιέργειας, αν και παρέχει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στη σύλληψη άγριων ψαριών, συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι ενεργοβόρες λειτουργίες, οι αλλαγές στις χρήσεις γης, η παραγωγή ζωοτροφών και η διαχείριση αποβλήτων συμβάλλουν στο αποτύπωμα άνθρακα της υδατοκαλλιέργειας (MacLeod et al., 2019).

1.1. Πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην υδατοκαλλιέργεια

Η υδατοκαλλιέργεια γνώρισε ταχεία ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες και έχει καταστεί σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων. Καθώς η ζήτηση για θαλασσινά αυξάνεται, η υδατοκαλλιέργεια έχει καταστεί μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι της παραδοσιακής κτηνοτροφίας. Ωστόσο, η επέκταση της υδατοκαλλιέργειας συνεπάγεται επίσης περιβαλλοντικές προκλήσεις, όπως η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG), κυρίως οξειδίων του αζώτου (N_2O), μεθανίου (CH_4) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), από τις ζωοτροφές, την κατανάλωση γεωργικής ενέργειας, τα λιπάσματα και τον μεταβολισμό των ζώων (MacLeod et al., 2019).

Οι αναερόβιες συνθήκες στις λίμνες υδατοκαλλιέργειας ευνοούν την παραγωγή CH_4 λόγω της διάσπασης της οργανικής ύλης σε περιβάλλοντα με έλλειψη οξυγόνου (Pu et al., 2022). Επιπλέον, οι εκπομπές N_2O συνδέονται με τη μικροβιακή δραστηριότητα σε περιβάλλοντα πλούσια σε άζωτο, όπως αυτά που προκύπτουν από την υπερβολική εφαρμογή λιπασμάτων ή ζωοτροφών (Bano et al., 2024).

1.2. Εκπομπές οξειδίου του αζώτου και οι επιπτώσεις τους

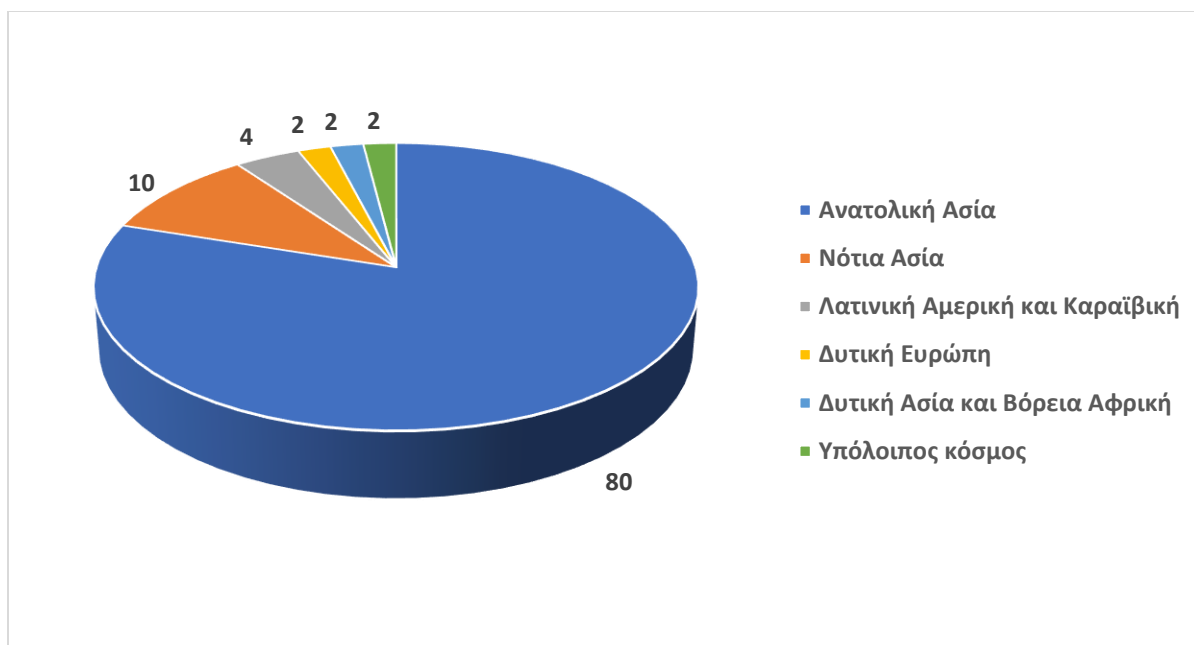
Το N_2O παράγεται κυρίως από τη μικροβιακή μετατροπή του αζώτου στα εδάφη κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, αλλά και από τη μικροβιακή μετατροπή αζωτούχων ενώσεων από ζωοτροφές και λιπάσματα σε λίμνες υδατοκαλλιέργειας (MacLeod et al., 2019). Η IPCC (2007) ανέφερε αυξημένες συγκεντρώσεις σε N_2O και CH_4 από τη βιομηχανική εποχή, γεγονός που προκαλεί ανησυχία, δεδομένου ότι και τα δύο αέρια, αν και υπάρχουν σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με αυτές του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), έχουν 298 (N_2O) και 25 φορές (CH_4) μεγαλύτερο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη από το CO_2 σε μια χρονική περίοδο 100 ετών. Ο ρυθμός σχηματισμού του N_2O καθορίζεται από διάφορους φυσικοχημικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και το pH, οι οποίοι μπορεί να μεταβάλλονται εποχιακά. Αυξημένες εκπομπές N_2O από την υδατοκαλλιέργεια έχουν αναφερθεί σε συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας υψηλής πυκνότητας, ιδίως στην Ασία, όπου η επέκταση της υδατοκαλλιέργειας είναι πιο σημαντική (FAO, 2020). Μελέτες δείχνουν ότι ακόμη και οι υδατοκαλλιέργειες μικρής κλίμακας μπορούν να συμβάλουν σε εκπομπές N_2O συγκρίσιμες με εκείνες από γεωργικές δραστηριότητες (Rahman et al., 2022).

1.3. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου στην υδατοκαλλιέργεια

Το CO₂ εκπέμπεται από την κατανάλωση ενέργειας πριν από τη λειτουργία (που σχετίζεται κυρίως με την παραγωγή ζωοτροφών και λιπασμάτων), την κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία (π.χ. άντληση νερού, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, χρήση άλλων καυσίμων) και τη διανομή και επεξεργασία μετά τη λειτουργία. Οι εκπομπές CO₂ προκύπτουν επίσης από τις μεταβολές στα αποθέματα άνθρακα πάνω και κάτω από το έδαφος που προκαλούνται από τη χρήση γης και την αλλαγή χρήσης γης (LUC) (μετατροπή βοσκοτόπων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις). Το CH₄, το οποίο παράγεται κυρίως από την αναερόβια αποσύνθεση της οργανικής ύλης στην πλημμυρισμένη καλλιέργεια ρυζιού, μπορεί επίσης να παραχθεί από τη διαχείριση των αποβλήτων των ιχθυοτροφείων. (MacLeod, 2019). Οι ιχθυοκαλλιέργειες παράγουν οργανικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των μη καταναλωθεισών ζωοτροφών, των περιττωμάτων των ψαριών και άλλων υποπροϊόντων. Όταν αυτά τα υλικά αποσυντίθενται σε αναερόβιο περιβάλλον, όπως σε ιζήματα ή σε λιμνοδεξαμενές αποβλήτων με κακή διαχείριση, απελευθερώνεται μεθάνιο (CH₄) (Pu et al., 2022).

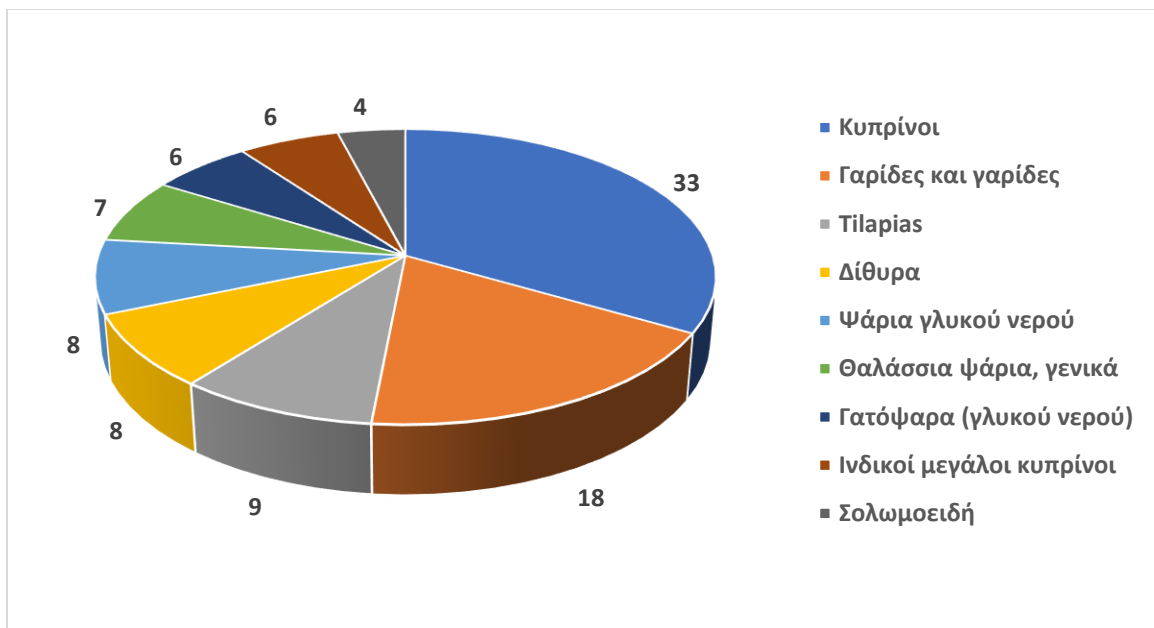
1.4. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην παγκόσμια υδατοκαλλιέργεια

Οι MacLeod κ.ά. (2019) εξέτασαν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας, ενός σύνθετου τομέα που αποτελείται από πολλά διαφορετικά είδη που εκτρέφονται σε διάφορα συστήματα και περιβάλλοντα. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις κύριες ομάδες καλλιεργούμενων υδρόβιων ειδών, εξαιρουμένων των θαλάσσιων φυτών. Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός και καταναλωτής υδρόβιων προϊόντων στον κόσμο, με τον τομέα της υδατοκαλλιέργειας να διαδραματίζει βασικό ρόλο στη διασφάλιση της παγκόσμιας επισιτιστικής ασφάλειας (FAO, 2020). Ο τομέας της αλιείας στην Ινδονησία παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη το 2023, συμβάλλοντας κατά περίπου 3,2% στο ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ) της χώρας (Sulistijowati et al., 2023). Συνολικά, η Ανατολική και η Νότια Ασία είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας το 90 % της συνολικής παραγωγής (Σχήμα 1).



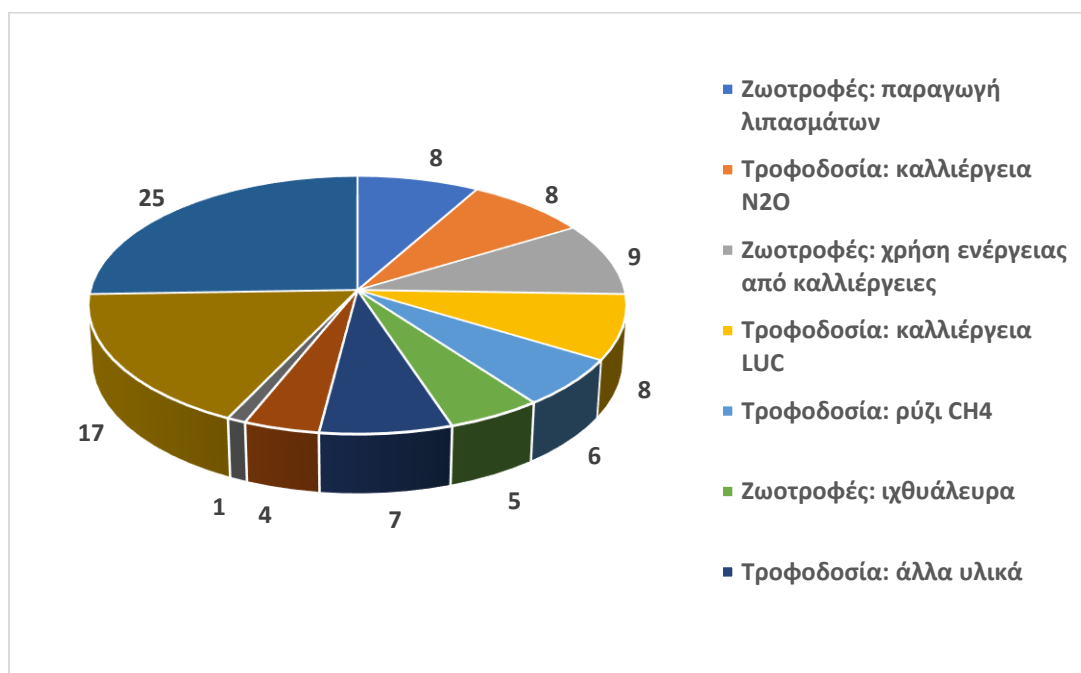
Σχήμα 1. Ποσοστιαίο μερίδιο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά περιοχή. Πηγή: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. *Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture* (Ποσοτικοποίηση και μετρίασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την παγκόσμια υδατοκαλλιέργεια). Τεχνικό έγγραφο του FAO για την αλιεία και την υδατοκαλλιέργεια αριθ. 626. Ρώμη, FAO.

Κατά την ανάλυση των δεδομένων για τα διάφορα είδη, γίνεται σαφές ότι η παραγωγή κυπρινοειδών αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό 33%, ακολουθούμενη από την υδατοκαλλιέργεια γαρίδας και γαρίδας σε ποσοστό 18%. Οι εντατικές γαριδοτροφικές λίμνες είχαν ιδιαίτερα υψηλότερη παραγωγικότητα και προκάλεσαν επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδίως στις παράκτιες περιοχές, καθώς παράγουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου λόγω των αναερόβιων συνθηκών που συχνά επικρατούν στους λασπώδεις πυθμένες των λιμνών (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Ποσοστιαίο μερίδιο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά ομάδα ειδών. Πηγή: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. *Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture* (Ποσοτικοποίηση και μετριασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την παγκόσμια υδατοκαλλιέργεια). Τεχνικό έγγραφο του FAO για την αλιεία και την υδατοκαλλιέργεια αριθ. 626. Ρώμη, FAO.

Μετά τα διάφορα αέρια και τις πηγές τους, η παραγωγή υδρόβιων ζωοτροφών έχει τη μεγαλύτερη επιρροή με το 55 % όλων των αερίων του θερμοκηπίου. Η χρήση γεωργικής ενέργειας και το υδάτινο N₂O έχουν επίσης σημαντικό μερίδιο (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Ποσοστιαίο μερίδιο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά κατηγορία πηγής. Πηγή: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. *Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture* (Ποσοτικοποίηση και μετριάσμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την παγκόσμια υδατοκαλλιέργεια). Τεχνικό έγγραφο του FAO για την αλιεία και την υδατοκαλλιέργεια αριθ. 626. Ρώμη, FAO.

2. Χρήση ενέργειας

Το ανθρακικό αποτύπωμα των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας συνδέεται άμεσα με τις χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Σε πολλές περιοχές, οι επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, η οποία απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες CO₂ στην ατμόσφαιρα. Η ένταση άνθρακα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει ανάλογα με το ενεργειακό μείγμα μιας συγκεκριμένης περιοχής. Σε περιοχές όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως από άνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, το αποτύπωμα άνθρακα των επιχειρήσεων υδατοκαλλιέργειας μπορεί να είναι σημαντικό. Η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας στις επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας συμβάλλει άμεσα στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη χρήση ενέργειας στην υδατοκαλλιέργεια μπορεί να είναι σημαντικές, ιδίως για μεγάλες, ενεργοβόρες επιχειρήσεις (Li et al., 2024).

2.1. Ενέργεια και βιωσιμότητα στην υδατοκαλλιέργεια

Παρά τη σημασία της υδατοκαλλιέργειας για την παραγωγή τροφίμων, έχουν εκφραστεί ανησυχίες σχετικά με την επέκτασή της (Naylor et al., 2000). Ορισμένα από τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με την υδατοκαλλιέργεια είναι η παραγωγή ζωοτροφών και η απελευθέρωση πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον λόγω του μεταβολισμού των ζώων (Thomas et al., 2021). Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των προϊόντων, των διαδικασιών ή των υπηρεσιών αξιολογείται συχνά με την Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (AKZ), η οποία είναι μια μεθοδολογία που ορίζεται από τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 (ISO, 2006a, 2006b) για την ποσοτικοποίηση των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, την ανθρώπινη υγεία και τους φυσικούς πόρους που προκαλούνται από προϊόντα και συστήματα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Cucurachi et al., 2019). Η χρήση ενέργειας στην υδατοκαλλιέργεια είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των συνθηκών που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των εκτρεφόμενων ειδών, όπως η κυκλοφορία του νερού, ο αερισμός, η ρύθμιση της θερμοκρασίας και η σίτιση (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Χρήση ενέργειας στα διάφορα στάδια των εργασιών υδατοκαλλιέργειας

Δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας	Ενεργειακές απαιτήσεις
Εκκολαπτήρια και φυτώρια	έλεγχο της θερμοκρασίας, φωτισμό και κυκλοφορία του νερού.
Συστήματα λιμνών και δεξαμενών	Αερισμός, άντληση και διήθηση

Συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία (RAS)	επεξεργασία νερού και ρύθμιση θερμοκρασίας
Κλωβός και υπεράκτια συστήματα	Μεταφορά σκαφών, συστήματα σίτισης και συγκομιδή
Παραγωγή και επεξεργασία ζωοτροφών	Προμήθεια, κατασκευή και μεταφορά συστατικών υψηλής ενεργειακής έντασης

Ωστόσο, αυτές οι ενεργειακές απαιτήσεις, ιδίως όταν τροφοδοτούνται με ορυκτά καύσιμα, συμβάλλουν στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που επιδεινώνουν την υπερθέρμανση του πλανήτη. Καθώς ο κλάδος συνεχίζει να επεκτείνεται, η κατανόηση και ο μετριασμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της υδατοκαλλιέργειας που σχετίζονται με την ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητάς του. Για να επιτευχθεί η βιωσιμότητα στην υδατοκαλλιέργεια, είναι ζωτικής σημασίας η εξισορρόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με την κατανάλωση ενέργειας. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Πρωτογενείς πηγές ενέργειας στην υδατοκαλλιέργεια

Πηγές ενέργειας	Μεταχειρισμένο
Ορυκτά καύσιμα (ντίζελ, άνθρακας, φυσικό αέριο)	γεννήτριες, εγκαταστάσεις μεταφοράς και παραγωγής.
Ηλεκτρική ενέργεια	Κυρίως από μη ανανεώσιμες πηγές, τροφοδοτώντας αντλίες νερού, συστήματα αερισμού και ψύξης.

Η διαίρεση του συστήματος εκτροφής και, τέλος, η επιλογή ειδών με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ποιότητα ζωοτροφών και νερού μπορεί να μειώσει τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και τη χρήση ενέργειας. Το ενεργειακό κόστος της παραγωγής δεν περιλαμβάνει μόνο ζητήματα βιωσιμότητας όσον αφορά την αποδοτικότητα των πόρων του οικοσυστήματος και την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πόρων, αλλά και το δυνητικό κόστος για τις μελλοντικές κοινωνίες μέσω της περιβαλλοντικής αλλαγής από τη ρύπανση και την παγκόσμια κλιματική αλλαγή (FAO, 2022-Parker et al., 2018).

2.2. Ενεργοβόρες δραστηριότητες στην υδατοκαλλιέργεια

Η υδατοκαλλιέργεια είναι ένας πολύ ενεργοβόρος κλάδος στον οποίο οι διάφορες λειτουργίες απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας για τη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών για τα εκτρεφόμενα είδη. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν την κυκλοφορία του νερού, τον αερισμό, τον έλεγχο της θερμοκρασίας και τα συστήματα σίτισης, τα οποία είναι απαραίτητα για την προώθηση της ανάπτυξης και της υγείας των υδρόβιων οργανισμών. Η κατανάλωση ενέργειας που συνδέεται με

αυτές τις δραστηριότητες ποικίλλει ανάλογα με την κλίμακα της επιχείρησης και τα είδη που εκτρέφονται.

Κυκλοφορία νερού και αερισμός: Η διατήρηση επαρκών επιπέδων οξυγόνου στις εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία και την επιβίωση των ψαριών και των οστρακοειδών. Τα συστήματα αερισμού χρησιμοποιούνται συνήθως για την αύξηση των επιπέδων οξυγόνου στο νερό, ιδίως σε εγκαταστάσεις εντατικής υδατοκαλλιέργειας όπου καλλιεργείται μεγάλος αριθμός οργανισμών σε περιορισμένο χώρο. Τα συστήματα αυτά απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας, ιδίως σε μεγάλες επιχειρήσεις. Τα συστήματα κυκλοφορίας του νερού χρησιμοποιούνται επίσης για να διασφαλιστεί ότι το οξυγόνο, τα θρεπτικά συστατικά και τα απόβλητα κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το νερό, αυξάνοντας περαιτέρω τις ενεργειακές απαιτήσεις (Tacon & Metian, 2009).

Έλεγχος θερμοκρασίας: Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών. Σε ορισμένες περιοχές, οι επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας πρέπει να ρυθμίζουν τις θερμοκρασίες του νερού ώστε να δημιουργούνται βέλτιστες συνθήκες για τα είδη που εκτρέφονται. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε ψυχρότερα κλίματα ή κατά την εκτροφή τροπικών ειδών σε εύκρατες περιοχές. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας απαιτεί συχνά ενεργοβόρα συστήματα, όπως θερμαντήρες, ψύκτες και εναλλάκτες θερμότητας. Τα συστήματα αυτά είναι σημαντικά για να διασφαλιστεί ότι το νερό παραμένει στο ιδανικό εύρος θερμοκρασίας για την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή, αλλά συμβάλλουν επίσης στην υψηλή κατανάλωση ενέργειας (Boyd & McNevin, 2015).

Συστήματα σίτισης: Τα αυτοματοποιημένα συστήματα σίτισης χρησιμοποιούνται συνήθως στην υδατοκαλλιέργεια για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της σίτισης και την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων. Τα συστήματα αυτά τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιούνται για τη διανομή τροφής σε μεγάλο αριθμό ψαριών ή οστρακοειδών με ελεγχόμενο τρόπο. Ενώ τα αυτοματοποιημένα συστήματα σίτισης μπορούν να βελτιώσουν τη μετατροπή της τροφής και τη συνολική παραγωγικότητα των επιχειρήσεων υδατοκαλλιέργειας, συμβάλλουν επίσης στις ενεργειακές απαιτήσεις της επιχείρησης (Matulić et al., 2020).

3. Αλλαγή χρήσης γης και μετατροπή οικοτόπων

Καθώς η παγκόσμια ζήτηση για ψάρια και θαλασσινά συνεχίζει να αυξάνεται, η συμφιλίωση της ανάπτυξης της υδατοκαλλιέργειας με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί μείζονα πρόκληση. Η ταχεία επέκταση της υδατοκαλλιέργειας έχει οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στη χρήση γης και στη μετατροπή οικοτόπων, επηρεάζοντας ιδιαίτερα οικολογικά πολύτιμα οικοσυστήματα όπως τα μαγκρόβια, οι υγρότοποι και οι παράκτιες περιοχές. Οι αλλαγές αυτές συμβάλλουν στην απώλεια της βιοποικιλότητας, στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και στη συνολική υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της υδατοκαλλιέργειας (Barbier et al., 2011).

3.1. Καταστροφή των μαγκρόβιων και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Η απώλεια ή η υποβάθμιση των οικοτόπων, ιδίως των παράκτιων οικοτόπων, όπως τα μαγκρόβια συστήματα και άλλοι υγρότοποι (λιβάδια θαλάσσιου χόρτου, αλυκές, παράκτιες λιμνοθάλασσες, εκβολές ποταμών), είναι μία από τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας (Wu, 1995; Dev, 1998; Naylor et al., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Ruiz et al., 2001; Pérez et al., 2008). Τα δάση των μαγκροβίων, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τα παράκτια οικοσυστήματα, αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή οργανικής ύλης σε αυτά τα περιβάλλοντα (Tidwell & Allan, 2001). Χρησιμεύουν επίσης ως κρίσιμα ενδιαιτήματα αναπαραγωγής για πολυάριθμα οικονομικά σημαντικά υδρόβια είδη, καθώς και ως περιοχές φωλιάσματος και ανάπαυσης για διάφορες άλλες ομάδες (Paez-Osuna, 2005). Επιπλέον, τα μαγκρόβια συμβάλλουν στην προστασία των ακτών, καθώς συγκρατούν ιζήματα, ρύπους, άζωτο και άνθρακα και μειώνουν τη διάβρωση (Alongi, 2002; Walters et al., 2008). Ωστόσο, ο ρυθμός αποψίλωσης των μαγκρόβιων δασών εκτιμάται σε 1-2 % ετησίως, με τις υδατοκαλλιέργειες γαριδών και ψαριών να αποτελούν την κύρια αιτία της απώλειας εκατομμυρίων εκταρίων μαγκρόβιων δασών σε χώρες όπως η Ταϊλάνδη, η Ινδονησία, ο Ισημερινός και η Μαδαγασκάρη (Naylor et al., 2000; Harper et al., 2007). Μελέτες που διεξήχθησαν σε θαλάσσια εκτροφεία κλωβών στην ακτογραμμή της Μεσογείου ανέφεραν την καταστροφή/ υποβάθμιση των λιβαδιών *Posidonia oceanica*, ως συνέπεια της υψηλής οργανικής και θρεπτικής φόρτισης από τις δραστηριότητες ιχθυοκαλλιέργειας. Η μετατροπή των δασών μαγκρόβιων σε γαριδοτροφικές μονάδες (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001) έχει προκαλέσει κυρίως την απώλεια περιοχών τροφοληψίας, αναπαραγωγής, καταφυγής και αναπαραγωγής για μια μεγάλη ποικιλία θαλάσσιων και χερσαίων ζώων (Ruiz et al., 2001; Pérez et al., 2008), καθώς και την απώλεια της φυσικής προστασίας από πλημμύρες, καταιγίδες και τυφώνες (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001).

Η καταστροφή των μαγκρόβια για την υδατοκαλλιέργεια όχι μόνο τους στερεί την ικανότητά τους να αποθηκεύουν άνθρακα, αλλά και απελευθερώνει αποθηκευμένο άνθρακα από το έδαφος στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τον Alongi (2015), η μετατροπή των δασών μαγκρόβιας βλάστησης σε γαριδοκαλλιέργειες οδηγεί σε σημαντική αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Καθώς τα μαγκρόβια είναι από τα πιο πυκνά σε άνθρακα οικοσυστήματα στον πλανήτη και μπορούν να αποθηκεύσουν έως και πέντε φορές περισσότερο άνθρακα ανά εκτάριο από ό,τι τα τροπικά δάση, η απώλειά τους αποτελεί κρίσιμο περιβαλλοντικό ζήτημα (Barbier et al., 2011). Εκτός από την απώλεια άνθρακα, η υποβάθμιση των παράκτιων υγροτόπων αυξάνει την ευπάθεια στη διάβρωση και τις πλημμύρες, αποδυναμώνει την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών και καθιστά τις τοπικές κοινότητες πιο ευάλωτες στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Barbier et al., 2011).

3.2. Μετατροπή υγροτόπων και γεωργικών εκτάσεων

Η επέκταση των υδατοκαλλιεργειών εσωτερικών υδάτων έχει επίσης οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στη χρήση γης, ιδίως μέσω της μετατροπής γεωργικών εκτάσεων και υγροτόπων σε υδατοκαλλιεργείες. Με γνώμονα τα οικονομικά πλεονεκτήματα της υδατοκαλλιεργείας, η οποία συχνά αποφέρει υψηλότερες οικονομικές αποδόσεις σε σχέση με την παραδοσιακή γεωργία, η μετατροπή αυτή επιφέρει διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα (Ahmed & Thompson, 2019). Ένα μείζον ζήτημα είναι η καταστροφή των οικοσυστημάτων, καθώς οι υγρότοποι που είναι σημαντικοί για το φιλτράρισμα του νερού, τον έλεγχο των πλημμυρών και τη βιοποικιλότητα αποξηραίνονται για να δημιουργηθεί χώρος για λίμνες υδατοκαλλιεργείας. Αυτό οδηγεί σε απώλεια της βιοποικιλότητας και υποβαθμίζει την ικανότητα του τοπίου να αντιμετωπίσει τις περιβαλλοντικές αλλαγές.

Οι Rahman et al. (2022) δείχνουν ότι η μετατροπή της γεωργικής γης σε περιοχές υδατοκαλλιεργείας οδηγεί σε σημαντικές και συχνά μη αναστρέψιμες οικολογικές ζημιές, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές χρήσης της γης. Επιπλέον, η εντατική υδατοκαλλιεργεία μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση οργανικών αποβλήτων, χημικών ουσιών και περίσσειας θρεπτικών ουσιών στο έδαφος και το νερό, με αποτέλεσμα τον ευτροφισμό. Η διαδικασία αυτή, που χαρακτηρίζεται από υπερβολικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών, οδηγεί σε άνθιση των φυκών και μείωση του οξυγόνου και έχει σοβαρές επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα (Boyd et al., 2020).

3.3. Κατακερματισμός των οικοτόπων και απώλεια βιοποικιλότητας

Η επέκταση της υδατοκαλλιεργείας έχει συμβάλει στον κατακερματισμό των ενδιαιτημάτων, ο οποίος διαταράσσει την οικολογική συνδεσιμότητα και δυσχεραίνει τη μετανάστευση, την αναπαραγωγή και την πρόσβαση των ειδών σε τροφικούς πόρους. Αυτός ο κατακερματισμός μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των πληθυσμών και απώλεια της βιοποικιλότητας. Η εισαγωγή ξενικών ειδών για σκοπούς αναπαραγωγής επιδεινώνει αυτές τις επιπτώσεις, καθώς ανταγωνίζονται ή αποδεκατίζουν τα ενδημικά είδη, αποσταθεροποιώντας περαιτέρω τα οικοσυστήματα (Chavez et al., 2020).

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν τις βαθιές επιπτώσεις του κατακερματισμού των ενδιαιτημάτων στη βιοποικιλότητα (Marrone et al., 2023). Η μετατροπή της γεωργικής γης σε περιοχές υδατοκαλλιεργείας έχει οδηγήσει σε μόνιμες οικολογικές αλλαγές, αναδεικνύοντας τη σημασία των βιώσιμων πρακτικών σε τέτοιες μεταβάσεις (Rahman et al., 2022). Η καταστροφή των ενδιαιτημάτων οδηγεί σε μείωση του μεγέθους των πληθυσμών και κατακερματισμό των περιοχών εξάπλωσης των ειδών, διαταράσσοντας τη μετακίνηση των ατόμων μεταξύ των τμημάτων ενδιαιτημάτων και μειώνοντας τις πιθανότητες επιβίωσής τους (Haddad et al., 2015).

4. Παραγωγή ζωοτροφών και χρήση πόρων

Η παραγωγή ζωοτροφών για την υδατοκαλλιέργεια αποτελεί σημαντική πτυχή του τομέα, αλλά έχει σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Η καλλιέργεια συστατικών ζωοτροφών, όπως το ιχθυάλευρο και τα φυτικά συστατικά, απαιτεί σημαντικούς φυσικούς πόρους, όπως γη, νερό και ενέργεια. Αυτό συμβάλλει στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Εκτιμάται ότι έως και το 90% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις ιχθυοκαλλιέργειες οφείλεται στην παραγωγή ζωοτροφών υδατοκαλλιέργειας (FAO, 2022). Καθώς η ζήτηση για προϊόντα υδατοκαλλιέργειας αυξάνεται, οι βιώσιμες πρακτικές για την παραγωγή ζωοτροφών είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας του κλάδου.

4.1. Ζωοτροφές για την υδατοκαλλιέργεια και εναλλακτικές πηγές

Στην υδατοκαλλιέργεια χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ζωοτροφών για την κάλυψη των διατροφικών απαιτήσεων των εκτρεφόμενων ψαριών και θαλασσινών και για τη διασφάλιση της ανάπτυξης και της υγείας των ζώων. Παραδοσιακά, το ιχθυάλευρο είναι το κύριο συστατικό των ζωοτροφών υδατοκαλλιέργειας. Το ιχθυάλευρο προέρχεται από μικρά πελαγικά ψάρια όπως ο γαύρος και η σαρδέλα. Ωστόσο, λόγω των ανησυχιών για την υπεραλίευση, την εξάντληση των πόρων και τη βιωσιμότητα των θαλάσσιων οικοσυστημάτων, το ενδιαφέρον για εναλλακτικές πηγές ζωοτροφών έχει αυξηθεί (Tacon & Metian, 2009).

Ως απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, ο κλάδος διερευνά εναλλακτικά συστατικά ζωοτροφών. Οι πρωτεΐνες φυτικής προέλευσης, όπως η σόγια, το καλαμπόκι και το σιτάρι, είναι μερικές από τις πιο συχνά διερευνώμενες επιλογές. Τα συστατικά αυτά θεωρούνται ως δυνητικά υποκατάστατα του ιχθυαλευρού και χρησιμοποιούνται στις ζωοτροφές υδατοκαλλιέργειας για τη μείωση της εξάρτησης από τους θαλάσσιους πόρους (Duarte et al., 2020; O'Flynn et al., 2021). Επιπλέον, οι πρωτεΐνες με βάση τα έντομα, π.χ. από μύγες-στρατιώτες και αλευρώδεις, έχουν πρόσφατα αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση. Αυτές οι πρωτεΐνες εντόμων μπορούν να καλλιεργηθούν σε οργανικά απόβλητα και προσφέρουν μια πιθανή λύση για τη μείωση της ανάγκης μετατροπής γης και την ελαχιστοποίηση των οικολογικών επιπτώσεων (Freda et al., 2022).

Συνολικά, η αναζήτηση εναλλακτικών συστατικών ζωοτροφών αντικατοπτρίζει την αυξανόμενη συνειδητοποίηση της ανάγκης συμφιλίωσης της ιχθυοκαλλιέργειας με τη βιωσιμότητα. Αυτή η μετατροπή των πηγών ζωοτροφών αποσκοπεί στη μείωση της εξάρτησης από τους θαλάσσιους πόρους, διατηρώντας παράλληλα τη διατροφική ποιότητα της τροφής για τα εκτρεφόμενα είδη.

4.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ζωοτροφών στην υδατοκαλλιέργεια

4.2.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των φυτικών ζωοτροφών

Η αντικατάσταση του ιχθυάλευρου με συστατικά φυτικής προέλευσης, όπως η σόγια και ο αραβόσιτος, μειώνει την πίεση στα θαλάσσια οικοσυστήματα, αλλά δημιουργεί νέα περιβαλλοντικά προβλήματα (Tacon & Metian, 2009). Η αυξανόμενη ζήτηση για αυτές τις εναλλακτικές λύσεις έχει οδηγήσει σε μεγάλης κλίμακας μετατροπή της γης, ιδίως στις τροπικές περιοχές, για να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση για γεωργικούς πόρους (Fargione et al., 2023). Αυτή η αλλαγή στη χρήση της γης έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης της αποψίλωσης των δασών, της απώλειας οικοτόπων και της μείωσης της βιοποικιλότητας. Τα τροπικά τροπικά δάση πλήττονται ιδιαίτερα, καθώς μεγάλες εκτάσεις εκχερσώνονται για την καλλιέργεια καλλιεργειών όπως η σόγια και ο αραβόσιτος, οι οποίες είναι σημαντικές για την παραγωγή ζωοτροφών (Fargione et al., 2023).

4.2.2. Επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Εκτός από τη μετατροπή της γης, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ζωοτροφών με βάση τις καλλιέργειες επεκτείνονται στην επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής μέσω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Η μετατροπή των δασών σε γεωργική γη για την παραγωγή ζωοτροφών συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Αυτό συμβαίνει όχι μόνο άμεσα μέσω της απώλειας της αποθήκευσης άνθρακα στα δάση, αλλά και μέσω των ενεργοβόρων διαδικασιών που εμπλέκονται στην εκχέρσωση και τη μεταφορά (Soussana et al., 2021). Επιπλέον, η χρήση συνθετικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στην καλλιέργεια των φυτών οδηγεί στην έκλυση οξειδίου του αζώτου (N_2O), ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου που επιδεινώνει την υπερθέρμανση του πλανήτη (Pardoe et al., 2022). Αυτές οι εκπομπές αποσταθεροποιούν τόσο το τοπικό όσο και το περιφερειακό κλίμα και καθιστούν τη βιομηχανία υδατοκαλλιέργειας πιο ευάλωτη στις προκλήσεις που σχετίζονται με το κλίμα.

4.2.3. Υποβάθμιση της γης, κατανάλωση νερού και γεωργική βιοποικιλότητα

Ως βασικό συστατικό πολλών ζωοτροφών υδατοκαλλιέργειας, η σόγια έχει καταστεί σημαντικός παράγοντας διαφόρων περιβαλλοντικών προβλημάτων, ιδίως όσον αφορά την υποβάθμιση του εδάφους, την υπερβολική κατανάλωση νερού και την απώλεια της γεωργικής βιοποικιλότητας (Magrin et al., 2020). Η ταχεία επέκταση των μονοκαλλιεργειών σόγιας έχει οδηγήσει σε ανησυχίες σχετικά με τη διάβρωση του εδάφους, την απορροή θρεπτικών στοιχείων και την αυξημένη ευαισθησία σε παράσιτα και ασθένειες. Τα προβλήματα αυτά απαιτούν συχνά την αυξημένη χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, τα οποία επιδεινώνουν περαιτέρω την περιβαλλοντική ζημία. Τέτοιες πρακτικές συμβάλλουν στη ρύπανση των υδάτων και τον ευτροφισμό, βλάπτοντας τόσο τα οικοσυστήματα των γλυκών υδάτων όσο και τα θαλάσσια

οικοσυστήματα (Pardoe et al., 2022). Επιπλέον, η καταστροφή πολύτιμων οικοσυστημάτων όπως οι υγρότοποι και τα δάση για την επέκταση της γεωργίας διαταράσσει τους τοπικούς κύκλους του άνθρακα, μειώνει την ικανότητα του τοπίου να προσαρμόζεται στην κλιματική αλλαγή και αυξάνει την ευπάθεια σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως οι πλημμύρες και οι ξηρασίες (Fargione et al., 2023).

4.2.4. Ανθρακικό αποτύπωμα και κατανάλωση ενέργειας

Εκτός από τις αλλαγές στις χρήσεις γης, οι γεωργικές διεργασίες μεγάλης κλίμακας για την παραγωγή ζωοτροφών αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Soussana et al., 2021). Οι ενεργοβόρες διεργασίες που συνδέονται με τη μετατροπή της γης, καθώς και η υψηλή ζήτηση λιπασμάτων και μεταφορών, συμβάλλουν σε ένα σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα. Επιπλέον, η μεταποίηση φυτικών υλικών σε ιχθυοτροφές περιλαμβάνει συχνά ενεργοβόρες διαδικασίες, γεγονός που επιδεινώνει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σοβαρό όταν στις διαδικασίες παραγωγής περιλαμβάνονται ορυκτά καύσιμα. Ως αποτέλεσμα, αυτές οι περιβαλλοντικές προκλήσεις υπογραμμίζουν τις ανησυχίες σχετικά με τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των εναλλακτικών ζωοτροφών φυτικής προέλευσης ενόψει της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.

4.3. Επιλογή ζωοτροφών και διατροφή στην υδατοκαλλιέργεια

4.3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της τροφής

Η επιλογή της τροφής για τα εκτρεφόμενα ψάρια και καρκινοειδή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των διατροφικών συνηθειών των ειδών (φυτοφάγα, παμφάγα ή σαρκοφάγα), της αγοραίας αξίας των ειδών και του χρησιμοποιούμενου συστήματος εκτροφής. Το σύστημα εκτροφής, είτε πρόκειται για χωμάτινη λίμνη, περίφραξη, ιχθυοτροφείο ή κλωβό, επηρεάζει επίσης την επιλογή της τροφής. Τα εντατικά συστήματα απαιτούν ειδικά διαμορφωμένες ζωοτροφές για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και του ρυθμού μετατροπής της τροφής (FCR), ενώ τα εκτατικά συστήματα μπορούν να βασίζονται περισσότερο σε φυσικούς τροφικούς οργανισμούς (Tacon et al., 2013).

4.3.2. Οικονομικές και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις στην επιλογή ζωοτροφών

Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η διαθεσιμότητα ζωοτροφών που παρασκευάζονται στο εμπόριο. Εάν αυτές δεν είναι διαθέσιμες ή ακατάλληλες, οι κτηνοτρόφοι μπορούν να στραφούν σε ζωοτροφές που παράγονται στο σπίτι από τοπικά συστατικά, όπως ψάρια χαμηλής ποιότητας ή γεωργικά υποπροϊόντα. Οι οικονομικοί πόροι του κτηνοτρόφου, όπως το κόστος των ζωοτροφών, της αποθήκευσης και της εργασίας, παίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Tacon et al., 2013). Οι κακές στρατηγικές σίτισης, όπως η υπερβολική σίτιση, μπορεί να οδηγήσουν σε σπατάλη θρεπτικών συστατικών και ρύπανση του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των ζωοτροφών πρέπει επίσης να επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ της οικονομικής αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (White, 2013).

4.3.3. Ποιότητα ζωοτροφών και αποδοτικότητα ζωοτροφών

Ένα σημαντικό μέλημα στην υδατοκαλλιέργεια είναι η κάλυψη των διατροφικών απαιτήσεων των ψαριών μέσω της κατάλληλης χορήγησης τροφής που βελτιστοποιεί την ανάπτυξη και τον FCR. Οι απαιτήσεις των ειδών ψαριών σε ενέργεια και θρεπτικά συστατικά μπορεί να διαφέρουν καθημερινά, εποχιακά και από άτομο σε άτομο. Οι μη ισορροπημένες δίαιτες, η υποθρεψία ή η υπερθρεψία μπορούν να μειώσουν την αποδοτικότητα της παραγωγής και να συμβάλουν στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος, ιδίως στην εκτροφή σε κλωβούς (Bureau, et al., 2006- Thorpe and Cho, 1995). Για την ελαχιστοποίηση της σπατάλης και την επίτευξη τόσο της οικονομικής όσο και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, οι κατάλληλες στρατηγικές διαχείρισης των ζωοτροφών είναι απαραίτητες (Talbot, Corneillie and Korsøen, 1999; Cho and Bureau, 1998).

4.3.4. Υπεραλίευση

Η εκμετάλλευση των άγριων πόρων και της βιοποικιλότητας για την παραγωγή ζωοτροφών υδατοκαλλιέργειας και την προμήθεια σπόρων και γόνου μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημία στα υδάτινα οικοσυστήματα (Dev, 1998; Choo, 2001; Pérez-Osuna, 2001). Άγρια είδη ψαριών χαμηλής εμπορικής αξίας, όπως ο ιαπωνικός γαύρος και το σκουμπρί, χρησιμοποιούνται συχνά ως τροφή για σαρκοφάγα ψάρια ή ως συμπληρωματική τροφή για είδη όπως οι γαρίδες, η τιλάπια και το γαλατόψαρο. Η πρακτική αυτή ασκεί πρόσθετη πίεση στα ήδη υπεραλιευμένα αποθέματα άγριων ψαριών. Η απομάκρυνση άγριων ψαριών όπως το χέλι, η σφυρίδα, η κιτρινόψαρο και ο τόνος συμβάλλει περαιτέρω στην εξάντληση των φυσικών πληθυσμών.

Η συλλογή σπόρων γαρίδας και οστρακοειδών άγριας αλιείας είναι ιδιαίτερα επιβλαβής, καθώς όχι μόνο απειλεί τα είδη-στόχους, αλλά σκοτώνει και οργανισμούς μη-στόχους, όπως άλλα είδη γαρίδας, μακροζωοπλαγκτόν και νεαρά ψάρια και οστρακοειδή. Αυτή η διατάραξη του τροφικού πλέγματος επηρεάζει ένα ευρύ φάσμα οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των υδρόβιων πτηνών, των ερπετών και των θηλαστικών, με αποτέλεσμα αυξημένη θνησιμότητα και μειωμένη επιτυχία αναπαραγωγής (Choo, 2001). Επιπλέον, η απομάκρυνση άγριων ειδών μπορεί να οδηγήσει σε γενετική υποβάθμιση των γηγενών πληθυσμών και καταστροφή των φυσικών ενδιαιτημάτων, με αποτέλεσμα την περαιτέρω διατάραξη του υδάτινου οικοσυστήματος (Dev, 1998). Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα είδη που αλιεύονται σε μεγάλο βαθμό και εκείνα με χαμηλή αναπαραγωγική ικανότητα. Όσο η παραγωγή γόνου σε αιχμαλωσία είναι δαπανηρή, η αγορά άγριων αναπαραγωγικών ατόμων είναι πιθανό να συνεχιστεί και να προκαλέσει περαιτέρω περιβαλλοντική ζημία (Nash, 2005).

5. Απόβλητα

Οι εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας μπορούν να παράγουν σημαντικές ποσότητες αποβλήτων/εκροών που περιέχουν ποικίλες ουσίες, όπως σωματιδιακό υλικό (κυρίως από μη φαγωμένη τροφή και κόπρανα), διαλυμένα προϊόντα μεταβολισμού (από την απέκκριση μέσω των βράγχιων και των νεφρών) και διάφορες μορφές χημικών ουσιών (π.χ. θεραπευτικά, λιπάσματα,

βαρέα μέταλλα), με ανεπιθύμητες συνέπειες για το περιβάλλον (Wu 1995- Dev 1998- Pérez-Osuna 2001- Read and Fernandes 2003). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τα σωματιδιακά και διαλυμένα οργανικά και ανόργανα υλικά (Πίνακας 3) είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς οι ενώσεις αυτές εισέρχονται άμεσα στο περιβάλλον και επηρεάζουν τόσο τη στήλη νερού όσο και το ίζημα (Dalsgaard & Krause-Jensen 2006- Holmer et al. 2007). Η έκταση αυτών των επιπτώσεων εξαρτάται κυρίως από την τοποθεσία της εκμετάλλευσης, το είδος των ζώων, τον τύπο της καλλιέργειας, την πυκνότητα του ζωικού κεφαλαίου, την πεπτικότητα της τροφής και άλλους παράγοντες εκτροφής, όπως οι πρακτικές διατροφής και η κατάσταση των ασθενειών (Wu 1995).

Πίνακας 3. Οδηγοί, πιέσεις, καταστάσεις, επιπτώσεις και αντιδράσεις για μια υποθετική ανάπτυξη υδατοκαλλιέργειας (Serpa & Duarte, 2008)

Οδηγός	Πίεση	Κράτος	Επιπτώσεις	Απάντηση
Ιχθυοκαλλιέργεια	Αυξημένες ροές θρεπτικών ουσιών	Αυξημένα θρεπτικά και οργανικά συγκεντρώσεις ύλης	Αυξημένο φυτοπλαγκτόν βιομάζα/ευτροφισμός	Παραγωγή φυκιών για την απομάκρυνση περίσσεια θρεπτικών συστατικών
	Αυξημένες ροές οργανικής ύλης Μειωμένα επίπεδα οξυγόνου και οξυγόνο	Μειωμένα επίπεδα οξυγόνου. Συσσώρευση οργανικής ύλης στα ιζήματα	Υψηλότερη θνησιμότητα των βενθικών οργανισμοί/μειωμένη βενθική ποικιλομορφία	Αερισμός πυθμένα
	Αυξημένες δυνάμεις αντίστασης	Μειωμένη ροή και αυξημένος χρόνος παραμονής	Αυξημένη απόθεση ιζημάτων	Ανακατανομή σε περιοχές με μεγαλύτερη έντονη υδροδυναμική
	Απελευθέρωση ξενοβιοτικών	Βιοσυγκέντρωση	Αυξημένη θνησιμότητα μη στοχευόμενων είδη	Λιγότερο εντατική γεωργία για μείωση της διάδοσης των ασθενειών

Τα μετεωρολογικά (π.χ. πρότυπα ανέμων), υδρογραφικά (π.χ. βαθυμετρία, ρεύματα, παλιρροιακό καθεστώς, κυματική δράση, ρυθμοί καθίζησης) και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών υδατοκαλλιέργειας (Nordvang and Hakanson, 2002; Kalantzi and Karakassis, 2006), επηρεάζουν έντονα την τύχη κάθε είδους αποβλήτων που απελευθερώνονται στη στήλη του νερού.

Τα λύματα από συστήματα εντατικής παραγωγής, με μεγάλη εισροή ζωοτροφών, έχουν συνήθως μεγαλύτερες αρνητικές επιπτώσεις από τα λύματα από ημιεντατικά ή εκτατικά συστήματα με μικρή ή καθόλου προσθήκη ζωοτροφών (Kautsky et al., 2000; PérezOsuna, 2001).

Τα απόβλητα των υδατοκαλλιεργειών, συμπεριλαμβανομένων των μη καταναλωθεισών ζωοτροφών, των περιττωμάτων των ψαριών και των χημικών υπολειμμάτων, έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η περίσσεια θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, συμβάλλουν στη ρύπανση των υδάτων και τον ευτροφισμό, οδηγώντας σε μείωση του οξυγόνου και σε επιβλαβείς ανθίσεις φυκών. Η χρήση χημικών στην υδατοκαλλιέργεια μπορεί να οδηγήσει σε ανθεκτικότητα στα αντιβιοτικά και σε διαταραχή του οικοσυστήματος, ενώ η υποβάθμιση των οικοτόπων, όπως η αποψίλωση των μαγκρόβιων δασών, απειλεί τη βιοποικιλότητα. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί βιώσιμες πρακτικές, όπως η βελτιωμένη διαχείριση των αποβλήτων και οι φιλικές προς το περιβάλλον τεχνικές εκτροφής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας στο περιβάλλον.

5.1. Ρύπανση από θρεπτικά συστατικά

Τα απόβλητα της υδατοκαλλιέργειας, ιδίως οι μη καταναλωθείσες ζωοτροφές και τα περιττώματα των ψαριών, εισάγουν υψηλά επίπεδα αζώτου και φωσφόρου στα γύρω ύδατα. Αυτός ο εμπλουτισμός με θρεπτικά συστατικά μπορεί να οδηγήσει σε ευτροφισμό, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υπερβολική άνθιση φυκών που μειώνει τα επίπεδα οξυγόνου και βλάπτει την υδρόβια ζωή.

Οι εισροές ανόργανων ενώσεων (π.χ. αμμωνία, νιτρικά, νιτρώδη και φωσφορικά άλατα) μέσω της διάσπασης της οργανικής ύλης, των εκκρίσεων των ζώων και της λίπανσης των λιμνών μπορεί επίσης να έχουν δυνητικά επικίνδυνες επιπτώσεις στο περιβάλλον (Wu, 1995; Dev, 1998; Tovar et al., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin 2007; Pérez et al., 2008). Οι περισσότερες από τις ανεπιθύμητες οικολογικές συνέπειες που σχετίζονται με την υπερβολική διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών από τις απορρίψεις υδατοκαλλιεργειών σχετίζονται με τον ευτροφισμό και περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την υπερτροφία και την εξάντληση του διαλυμένου οξυγόνου που προκαλούν την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων (Tovar et al., 2000a; Read & Fernandes, 2003). Τα θρεπτικά φορτία συμβάλλουν επίσης στη συγκέντρωση φυτικών θρεπτικών συστατικών στα υδάτινα συστήματα, διεγείροντας την ανάπτυξη των πρωτογενών παραγωγών (Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin, 2007) και μεταβάλλοντας ακόμη και τη δομή και τη σύνθεση αυτών των βασικών κοινοτήτων.

Εάν ο εμπλουτισμός με θρεπτικά συστατικά συμπέσει με ορισμένες φυσικές συνθήκες και άλλους, ελάχιστα κατανοητούς παράγοντες, μπορεί να υπάρξει ανάπτυξη τοξικών ειδών φυτοπλαγκτού, οδηγώντας στο σχηματισμό επιβλαβών ανθίσεων φυκών (Harmful Algal Blooms, HAB) (Biao & Kaijin, 2007). Για παράδειγμα, αναφορές HAB της *Chattonella marina*, που πιθανώς προκλήθηκαν από απορρίψεις λυμάτων από γαριδοτροφικές μονάδες, καταγράφηκαν κατά μήκος της ακτής στα βόρεια της Κίτρινης Θάλασσας το 1993 και το 1995 (Biao & Kaijin, 2007). Οι τοξικές ανθίσεις φυτοπλαγκτού μπορεί να παράγουν διάφορους τύπους τοξινών (π.χ. DSP-διαρροϊκή δηλητηρίαση οστρακοειδών, PSP - παραλυτική δηλητηρίαση οστρακοειδών και ASD - αμνησιακή νόσος των οστρακοειδών), που συχνά προκαλούν δηλητηρίαση οστρακοειδών και θνησιμότητα της βενθικής πανίδας και των άγριων/εκτρεφόμενων ψαριών, απειλώντας έτσι την

οικονομική βιωσιμότητα των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας (Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Gyllenhamman & Hakanson, 2005). Αν και το ενδεχόμενο ευτροφισμού φαίνεται απίθανο για τις θαλάσσιες εκτροφές σε κλωβούς λόγω της επίδρασης αραίωσης του θαλασσινού νερού (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001), δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα τοπικού ευτροφισμού σε περιοχές με κακή έκπλυση (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001). Όσον αφορά τις περιοχές περιορισμένης ανταλλαγής, όπως οι παράκτιες λιμνοθάλασσες και οι εκβολές ποταμών, η υπερβολική διαθεσιμότητα θρεπτικών μπορεί να επηρεάσει την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος και σε ορισμένες περιπτώσεις να επηρεάσει αρνητικά την ίδια τη δραστηριότητα της υδατοκαλλιέργειας (Dev, 1998; Páez-Osuna, 2001b).

5.2. Χημική μόλυνση

Η χρήση αντιβιοτικών και άλλων χημικών ουσιών στην υδατοκαλλιέργεια για την πρόληψη ασθενειών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο υπολειμμάτων στο περιβάλλον. Οι ουσίες αυτές μπορεί να διαταράξουν τα τοπικά οικοσυστήματα και να συμβάλουν στην ανάπτυξη βακτηρίων ανθεκτικών στα αντιβιοτικά. Η έρευνα δείχνει ότι οι ρύποι από τις υδατοκαλλιέργειες διασκορπίζονται γρήγορα στα ποτάμια, αλλά τα λύματα από τις ιχθυοκαλλιέργειες συμβάλλουν σε λιγότερο από το 1% των συνολικών αιωρούμενων στερεών, της βιολογικής ζήτησης οξυγόνου και του φωσφόρου που απορρίπτονται στο περιβάλλον. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: 1) πρόσθετα ζωοτροφών (π.χ. βιταμίνες, χρωστικές ουσίες, μέταλλα και ορμόνες), 2) απολυμαντικά (π.χ. χλωρίνη, πράσινο του μαλαχίτη) και φυτοφάρμακα (π.χ. μαλακισοκτόνα και ιχθυοκτόνα), 3) ασβεστοποιητικά υλικά, 4) μέταλλα (π.χ. αντιρρυπαντικά) και 5) κτηνιατρικά φάρμακα, συμπεριλαμβανομένων αντιβιοτικών, αναισθητικών, παρασιτοκτόνων και εμβολίων (Read & Fernandes, 2003) που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο εξωτερικών και εσωτερικών παρασίτων ή μικροβιακών λοιμώξεων (Costello et al., 2001).

Η χρήση αντιβιοτικών στην υδατοκαλλιέργεια έχει διάφορες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η ευρεία χρήση αντιβιοτικών στην υδατοκαλλιέργεια μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη βακτηρίων ανθεκτικών στα αντιβιοτικά, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν τα γονίδια αντοχής τους σε άλλα βακτήρια, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προκαλούν ασθένειες στον άνθρωπο και σε άλλα ζώα (Okocha et al., 2018). Τα αντιβιοτικά μπορούν να έχουν τοξικές επιδράσεις στις κοινότητες μικροοργανισμών σε υδάτινα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των κοινοτήτων φυκιών, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία των υδάτινων οικοσυστημάτων (Li et al., 2024). Επιπλέον, τα αντιβιοτικά και τα υποπροϊόντα τους μπορούν να παραμείνουν στο φυσικό περιβάλλον λόγω της δύσκολης βιοαποδόμησής τους, συσσωρεύονται σε ιζήματα, υδάτινες επιφάνειες και υπόγεια ύδατα, οδηγώντας σε μακροχρόνια μόλυνση του περιβάλλοντος. Η παρουσία αντιβιοτικών σε υδάτινα περιβάλλοντα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές αλλαγές στη σύνθεση και τη δομή των βακτηριακών κοινοτήτων, επηρεάζοντας τη συνολική υγεία και τη βιοποικιλότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων (Luthman et al., 2024). Επιπλέον, η χρήση αντιβιοτικών στην υδατοκαλλιέργεια μπορεί να οδηγήσει στην παρουσία

υπολειμματικών αντιβιοτικών στα ψάρια και σε άλλα προϊόντα υδατοκαλλιέργειας, δημιουργώντας κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων που καταναλώνουν τα προϊόντα αυτά. Η αδιάκριτη χρήση αντιβιοτικών στην υδατοκαλλιέργεια μπορεί επίσης να οδηγήσει σε διαταραχή της φυσιολογικής εντερικής χλωρίδας των υδρόβιων ζώων, οδηγώντας σε αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, η συσσώρευση αντιβιοτικών στο περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών ανθεκτικών στα αντιβιοτικά, οι οποίοι μπορούν να εξαπλωθούν σε άλλα οικοσυστήματα και να αποτελέσουν απειλή τόσο για την υδρόβια όσο και για τη χερσαία ζωή (Farias et al., 2024).

Χρησιμοποιούνται επίσης άλλα βιολογικά προϊόντα, όπως αποικοδομητές οργανικής ύλης (π.χ. βακτήρια και παρασκευάσματα ενζύμων) (Gräslund & Bengtsson, 2001). Η εφαρμογή αυτών των χημικών ουσιών εξαρτάται κυρίως από το σύστημα καλλιέργειας. Για παράδειγμα, ενώ οι ημιεντατικές γαριδοκαλλιέργειες απαιτούν ελάχιστη χρήση χημικών ουσιών, κυρίως λιπασμάτων και ασβεστοποιητικών υλικών (Boyd & Massaut, 1999; Choo, 2001; Gräslund & Bengtsson, 2001), καθώς η παραγωγή γαρίδας εντατικοποιείται, η διαχείριση γίνεται πιο προβληματική και ο αριθμός και η ποικιλία των χημικών ενώσεων αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό (Gräslund & Bengtsson, 2001).

Η εντατική καλλιέργεια σε λίμνες απαιτεί επίσης μεγαλύτερη ποικιλία χημικών ουσιών σε σύγκριση με τα συστήματα σε κλωβούς, τα οποία χρησιμοποιούν κυρίως απολυμαντικά, αντιρρυπαντικά και κτηνιατρικά φάρμακα (Kelly & Elberizon, 2001; Read & Fernandes, 2003). Οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση χημικών ενώσεων αφορούν: i) την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, ii) την παρέμβαση στις βιογεωχημικές διεργασίες, iii) την άμεση τοξικότητα στην άγρια πανίδα και χλωρίδα, iv) την ανάπτυξη ανθεκτικότητας από παθογόνους οργανισμούς και v) τη μείωση της προφυλακτικής αποτελεσματικότητας των θεραπευτικών ουσιών (Costello et al., 2001). Η ακατάλληλη χρήση χημικών ενώσεων μπορεί επίσης να επηρεάσει την ασφάλεια των προϊόντων υδατοκαλλιέργειας, αποτελώντας απειλή για την ανθρώπινη υγεία (Choo, 2001; Islam et al., 2004).

Περίληψη

Η υδατοκαλλιέργεια διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια, αλλά η ταχεία επέκτασή της έχει εγείρει σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες, ιδίως στην εποχή της κλιματικής αλλαγής. Ο κλάδος αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καταστροφής οικοτόπων και εξάντλησης πόρων. Το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου απελευθερώνονται μέσω των ενεργοβόρων λειτουργιών, της παραγωγής ζωοτροφών και της διαχείρισης αποβλήτων. Πολλές εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ενώ οι αναερόβιες συνθήκες στις λίμνες των ψαριών συμβάλλουν στην απελευθέρωση μεθανίου. Επιπλέον, οι εκπομπές οξειδίου του αζώτου προκύπτουν από περιβάλλοντα πλούσια σε άζωτο που δημιουργούνται από την περίσσεια ζωοτροφών και λιπασμάτων. Η ταχεία επέκταση της υδατοκαλλιέργειας έχει επίσης οδηγήσει σε εκτεταμένες

αλλαγές στη χρήση γης, ιδίως στα παράκτια και υδροτοπικά οικοσυστήματα. Τα μαγγρόβια και άλλοι ζωτικοί βιότοποι έχουν εκχερσωθεί για να δημιουργηθεί χώρος για γαριδοτροφικές μονάδες και ιχθυόσκαλες, οδηγώντας σε απώλεια βιοποικιλότητας, διάβρωση των ακτών και μειωμένη δέσμευση άνθρακα. Η παραγωγή ζωοτροφών είναι ένας από τους μεγαλύτερους συντελεστές του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της υδατοκαλλιέργειας, αντιπροσωπεύοντας την πλειονότητα των εκπομπών. Οι παραδοσιακές ζωοτροφές με βάση το ιχθυάλευρο ασκούν πίεση στους θαλάσσιους πόρους, ενώ οι εναλλακτικές λύσεις με βάση τα φυτά, όπως η σόγια, συμβάλλουν στην αποψίλωση των δασών, την υποβάθμιση της γης και την υπερβολική χρήση του νερού. Οι πρωτεΐνες με βάση τα έντομα και άλλες νέες πηγές ζωοτροφών προσφέρουν πιθανές λύσεις, αλλά η υιοθέτηση σε μεγάλη κλίμακα παραμένει περιορισμένη λόγω οικονομικών και υλικοτεχνικών προκλήσεων. Ένα άλλο μείζον ζήτημα είναι η παραγωγή αποβλήτων, καθώς οι μη καταναλωθείσες ζωοτροφές, τα περιττώματα των ψαριών και τα χημικά κατάλοιπα συμβάλλουν στη ρύπανση των υδάτων, τον ευτροφισμό και την επιβλαβή άνθιση των φυκών, οδηγώντας σε μείωση του οξυγόνου και ανισορροπίες των οικοσυστημάτων. Η χρήση αντιβιοτικών στην υδατοκαλλιέργεια εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ανθεκτικότητα στα αντιβιοτικά, η οποία μπορεί να επηρεάσει τόσο το υδάτινο περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί στροφή προς βιώσιμες πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας των ζωοτροφών, της υιοθέτησης υπεύθυνων στρατηγικών χρήσης γης και της εφαρμογής αποτελεσματικών λύσεων διαχείρισης αποβλήτων. Καθώς η παγκόσμια ζήτηση θαλασσινών συνεχίζει να αυξάνεται, η εξισορρόπηση της ανάπτυξης της υδατοκαλλιέργειας με την περιβαλλοντική υπευθυνότητα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας του κλάδου και την ελαχιστοποίηση των οικολογικών του επιπτώσεων.

Αναφορές

- Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue revolution and the changing land use pattern in aquaculture development. *Aquaculture Reports*, 14, 100219.
- Alongi, D.M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, vol. 29, no. 3, pp. 331–349.
- Alongi, D. M. (2015). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 56, 1-10.
- Bano, S., Wu, Q., Yu, S., Wang, X., & Zhang, X. (2024). Soil properties drive nitrous oxide accumulation patterns by shaping denitrifying bacteriomes. *Environmental Microbiome*, 19, 94.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, Vol. 81, No. 2, pp. 169-193.

- Biao, X., & Kaijin, Y. (2007). Shrimp farming in China: Environmental impact and sustainability. *Aquaculture International*, 15(5), 21-39
- Boyd, C. E., et al. (2020). Environmental assessment and management in aquaculture. *Aquaculture International*, 28(2), 697-716.
- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113-132.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of energy consumption by the fish farming and processing industry in Croatia and the potential for zero-emissions aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bureau, D. P., & Cho, C. Y. (2006). Feeding strategies and diet formulation to reduce waste outputs in aquaculture. *Aquaculture Research*, 37(3), 123–135.
- Chavez, J., et al. (2020). Effects of aquaculture on habitat fragmentation and ecosystem dynamics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 452-465.
- Choo, P. S. (2001). Mangroves, shrimps and aquaculture in Malaysia. *Aquaculture Asia Magazine*, 6(2), 5-7.
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Diet formulation and feeding systems to reduce environmental impact in aquaculture. *Aquaculture Research*, 29(3), 123–135
- Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., & Tukker, A. (2019). Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth*, 1(3), 292–297.
- Dalsgaard T, Krause-Jensen D (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture* 256:302–310.
- Dev, A.K. (1998) Fake Blue Revolution: Environmental and Socio-Economic Impacts of Shrimp Culture in the Coastal Areas of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 41, 63-88.
- Duarte, T. A., Correia, D. M., & Silva, J. L. (2020). The role of alternative protein sources in sustainable aquaculture: Plant-based proteins. *Aquaculture Research*, 51(4), 1234-1247.
- FAO (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. FAO.

Fargione, J., Tilman, D., & Clark, M. (2023). Agricultural expansion and its impact on biodiversity: A global perspective. *Nature Sustainability*, 6(3), 182-190.

Farias, D. R., Ibarra, R., Estévez, R. A., Tlustý, M. F., Nyberg, O., Troell, M., Avendaño-Herrera, R. & Norden, W. (2024). Towards Sustainable Antibiotic Use in Aquaculture and Antimicrobial Resistance: Participatory Experts' Overview and Recommendations. *Antibiotics*, 13(9), 887;

Freda, C. G., Smith, M., & Gupta, M. (2022). Insect protein as a sustainable alternative for aquaculture: An environmental review. *Journal of Insect Science*, 22(1), 10-20.

Gräslund, S., & Bengtsson, B. E. (2001). Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment—A review. *The Science of the Total Environment*, 280(1-3), 93-131.

Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Diez, J. M., Damschen, E. I., & Holt, R. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on biodiversity. *Nature Communications*, 6, 7926.

Harper, G.J., Steininger, M.K., Tucker, C.J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007). Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, vol. 34, no. 4, pp. 325–333.

Holmer, M., Hansen, P.K., Karakassis, I., Borg, J.A., Schembri, P.J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In: Holmer, M., Black, K., Duarte, C.M., Marbà, N., Karakassis, I. (eds) *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.

Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007): Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007). Sediment biogeochemical changes associated with fish farms in coastal Mediterranean regions. *Environmental Pollution*, 118(2), 313-319.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Islam, M. S., Kabir, M. S., Khan, S. I., Ekramullah, M., Nair, G. B., Sack, R. B., & Sack, D. A. (2004). Wastewater-grown duckweed may be safely used as fish feed. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(1), 51-56.

Kalantzi and Karakassis, 2006: Kalantzi, I., & Karakassis, I. (2006). Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52(5), 484-493.

Kautsky et al., 2000: Kautsky, N., Berg, H., Folke, C., Larsson, J., & Troell, M. (2000). Ecological footprint and trophic level impact of aquaculture: Implications for sustainability. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1-12

- Kelly, L. A., & Elberizon, I. R. (2001). Freshwater finfish cage culture. In K. D. Black (Ed.), *Environmental Impacts of Aquaculture* (pp. 1-32). Sheffield Academic Press.
- Li, Z., He, H., Ding, J., Zhang, Z., Leng, Y., Liao, M. & Xiong, W. (2024). Effects of Three Antibiotics on Nitrogen-Cycling Bacteria in Sediment of Aquaculture Water. *Water*, 16(9), 1256.
- Li, H., Liu, H., Zhou, X., Gao, L., Liang, J., Chen, L., Guo, Y., & Liang, S. (2024). Carbon footprint assessment and reduction strategies for aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), n/a.
- Luthman, O., Robb, D. H., F., Jørgensen, P. S. & Troell, M. (2024). Global overview of national regulations for antibiotic use in aquaculture production. *Aquaculture International*, 32:9253–9270.
- MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626*. Rome, FAO.
- Magrin, G. O., Rojas, S. M., & Tschakert, P. (2020). Soybean monocultures and their environmental impact: A case study of the expansion in South America. *Environmental Research Letters*, 15 (7), 074010.
- Matulić, D., Tomljanović, T., & Piria, M. (2020). Feeding systems in aquaculture: Efficiency and environmental impact. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 11(3), 123–135.
- Marrone, A., Mangano, M. C., Deidun, A., Berlino, M., & Sarà, G. (2023). Effects of habitat fragmentation of a Mediterranean marine reef on the associated fish community: Insights from biological traits analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1957.
- Naylor, R.L., Goldburg, R.J., J. H. Primavera, J.H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, vol. 405, no. 6790, pp. 1017–1024.
- Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.
- Nordvarg and Håkanson, 2002: Nordvarg, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359-379.
- O’Flynn et al., 2021: O’Flynn, N., FitzGerald, R. J., & Hayes, M. (2021). Plant-based proteins as alternatives to fishmeal in aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 27(3), 123–135.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O. & Adedeji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public Health Rev* 39, 21.

Páez-Osuna, F. (2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environmental Management*, 28(1), 131-140.

Paez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaronicultura en ' la zona costera, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 1, 21-31.

Pardoe, J. R., Leach, D. H., & Minchinton, T. E. (2022). Environmental challenges of plant-based feed ingredients in aquaculture: Implications for water and nutrient management. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111-121.

Parker et al. (2018): Parker, R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.

Pearson, T. H., & Black, K. D. (2001). *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press.

Pérez, M., Romero, J., & Duarte, C. M. (2008). *Nutrient dynamics in seagrass ecosystems*. Springer.

Pu, Y., Zhang, Mi., Jia, L., Zhang, Z., Xiao, W., Liu, Shoudong., Zhao, J., Xie, Y & Lee, X. (2022). Methane emission of lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 330, 107883.

Rahman, M., et al. (2022). Land use transformation and environmental consequences of aquaculture expansion in Sundarbans. *Environmental Sustainability*, 25(1), 87-104.

Read, P., & Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, 226(1-4), 139-163.

Ruiz, J. M., Pérez, M., & Romero, J. (2001). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: Seagrass decline after organic loading cessation. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), 38-41.

Serpa, D., Duarte, P. (2008). Impacts of Aquaculture and Mitigation Measures. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, vol 2, Special Issue 1, 1-20

Soussana, J. F., Lemaire, G., & Van de Kuilen, S. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture: Global impact of feed production. *Agricultural Systems*, 181, 102808.

Sulistijowati, R., Yuliati, L., Komariyah, S. & Musaiyaroh, A., (2023). Analysis of Trade, Investment, and Global Value Chain on the Gross Domestic Product of Fisheries Sector in Indonesia. *International Journal of professional business review*, vol 8, no 6.

Sun, Z., Wang, L., Tian, H., Jiang, H., Mou, X. & Sun, W. (2013). Fluxes of nitrous oxide and methane in different coastal Suaeda salsa marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*. Vol 90, 856-865.

Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2009). "Aquaculture feed and the environment: A global perspective." *Aquaculture*, 292(1-2), 1-13.

Talbot, C., Corneillie, S., & Korsøen, O. (1999). Optimal feeding strategies for cage farming of salmonids. *Aquaculture International*, 7(2), 123–135.

Tidwell, J.H. & Allan, G.L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. Ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries, *EMBO Reports*, vol. 2, no. 11, pp. 958–963.

Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767–784.

Thorpe, J. E., & Cho, C. Y. (1995). Nutritional requirements and feeding strategies for salmonids. *Aquaculture Nutrition*, 1(1), 77–87.

Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M. P., & Garcia-Vargas, M. (2000). Environmental impacts of intensive aquaculture: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7-12), 550-563.

United Nations Environment Programme. (2022). How do greenhouse gases actually warm the planet? <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-do-greenhouse-gases-actually-warm-planet>

Walters, B.B., Ronnback, P., J. Kovacs, J.M., Bradley B., Crona, B., Hussain, S.A., Badola, R., Primavera, J.H., Barbier, E & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, vol. 89, no. 2, pp. 220–236.

White, P. 2013. Environmental consequences of poor feed quality and feed management. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. *On-farm feeding and feed management in aquaculture*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583. Rome, FAO. pp. 553–564.

Wróbel, J., Gałczyńska, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., & Formicki, K. (2023). The challenges of aquaculture in protecting the aquatic ecosystems in the context of climate changes. *Journal of Water and Land Development*, 57, 231–241.

Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.

Λεξιλόγιο

Αναερόβιες συνθήκες: Όπως ο πυθμένας λιμνών ή υγροτόπων. Σε τέτοιες συνθήκες, το οργανικό υλικό διασπάται διαφορετικά, απελευθερώνοντας συχνά αέρια όπως το μεθάνιο.

Βιοποικιλότητα: Αναφέρεται στην ποικιλία της ζωής σε μια περιοχή, συμπεριλαμβανομένων των φυτών, των ζώων και των μικροοργανισμών. Η βιοποικιλότητα είναι απαραίτητη για υγιή οικοσυστήματα, καθώς κάθε είδος παίζει ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας.

Αποτύπωμα άνθρακα: Η συνολική ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου (όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο) που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η οδήγηση, η παραγωγή τροφίμων ή η λειτουργία βιομηχανιών, οι οποίες συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή.

Ευτροφισμός: Η διαδικασία κατά την οποία τα υδάτινα σώματα, όπως οι λίμνες ή τα ποτάμια, λαμβάνουν πάρα πολλά θρεπτικά συστατικά (όπως άζωτο και φώσφορο). Αυτό προκαλεί υπερβολική ανάπτυξη άλγης, η οποία μπορεί να εμποδίσει το ηλιακό φως και να μειώσει το οξυγόνο, βλάπτοντας την υδρόβια ζωή.

Λόγος μετατροπής ζωοτροφών (FCR): χρησιμοποιείται ως δείκτης στην υδατοκαλλιέργεια.

Αέρια θερμοκηπίου (GHG): Αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου, τα οποία παγιδεύουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα και συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη.