



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα
σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην ποιότητα των υδάτων και επιπτώσεις στην υδατοκαλλιέργεια

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια. Dr. Anželika Dautartė

Πανεπιστήμιο Vytautas Magnus

Εισαγωγή

Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής επηρεάζει σημαντικά τα υδάτινα οικοσυστήματα, ιδίως τις μεταβολικές και αναπτυξιακές διαδικασίες των υδρόβιων ειδών. Οι αυξημένες θερμοκρασίες επιταχύνουν τους μεταβολικούς ρυθμούς, αυξάνοντας τις απαιτήσεις των υδρόβιων οργανισμών σε οξυγόνο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προκλήσεις ανάπτυξης και αναπαραγωγής. Το παρόν κεφάλαιο διερευνά την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβολών της θερμοκρασίας και των φυσιολογικών διεργασιών των υδρόβιων ειδών, παρέχοντας πληροφορίες για το πώς αυτές οι δυναμικές επηρεάζουν την ποιότητα του νερού και την υγεία των οικοσυστημάτων. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει επίσης σε μεγάλο βαθμό τα παράκτια και εκβολικά οικοσυστήματα, με τις διακυμάνσεις της αλατότητας να αναδεικνύονται σε κρίσιμη συνέπεια. Το λιώσιμο των πολικών πάγων και τα μεταβαλλόμενα πρότυπα βροχοπτώσεων συμβάλλουν σημαντικά στις μεταβολές των επιπέδων αλατότητας, ιδίως σε περιοχές κοντά σε εισροές γλυκού νερού. Αυτές οι διακυμάνσεις θέτουν προκλήσεις για τους υδρόβιους οργανισμούς που εξαρτώνται από σταθερές συνθήκες αλατότητας, μεταβάλλοντας τη δυναμική των οικοσυστημάτων και απειλώντας τη βιοποικιλότητα (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Οι μεταβολές της αλατότητας λόγω της κλιματικής αλλαγής διαταράσσουν περαιτέρω τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι μεταβολές της αλατότητας, οι οποίες οφείλονται στο λιώσιμο των πολικών πάγων, στην αλλαγή των κατακρημνισμάτων και στην αύξηση των ρυθμών εξάτμισης, επηρεάζουν την κατανομή των θαλάσσιων ειδών, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα και περιπλέκοντας τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας. Η επιβάρυνση με θρεπτικά συστατικά από γεωργικές απορροές, βιομηχανικές απορρίψεις και αστική ρύπανση επιδεινώνει τον ευτροφισμό, οδηγώντας σε επιβλαβείς ανθίσεις φυκών (HAB), μείωση του οξυγόνου και σοβαρές διαταραχές στα θαλάσσια οικοσυστήματα και τα οικοσυστήματα γλυκού νερού. Ο ευτροφισμός, που γίνεται όλο και πιο διαδεδομένος λόγω των ανθρωπογενών επιδράσεων και της κλιματικής αλλαγής, έχει εκτεταμένες οικολογικές και οικονομικές συνέπειες (Zhang et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Η διαθεσιμότητα και η ποιότητα του νερού απειλούνται όλο και περισσότερο από τις διπλές πιέσεις της κλιματικής αλλαγής και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Οι ξηρασίες και η λειψυδρία, που επιδεινώνονται από την άνοδο της θερμοκρασίας και τα απρόβλεπτα πρότυπα βροχοπτώσεων, μεταβάλλουν τους υδρολογικούς κύκλους σε παγκόσμιο επίπεδο. Ταυτόχρονα, η υποβαθμισμένη ποιότητα των υδάτων λόγω ρύπανσης και κακής διαχείρισης θέτει σημαντικές προκλήσεις για τα



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

οικοσυστήματα και τους ανθρώπινους πληθυσμούς (DeNicola et al., 2015- Moussa et al., 2025). Η υπερθέρμανση του πλανήτη θέτει επίσης προκλήσεις για την υδατοκαλλιέργεια, καθώς μεταβάλλει τις περιβαλλοντικές συνθήκες που είναι απαραίτητες για τα υδρόβια είδη. Καθώς οι θερμοκρασίες του νερού αυξάνονται, πολλά είδη δυσκολεύονται να ευδοκιμήσουν εκτός των βέλτιστων θερμικών περιοχών τους, οδηγώντας σε μειωμένες αποδόσεις και αυξημένη θνησιμότητα. Επιπλέον, τα θερμότερα νερά δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για παθογόνους μικροοργανισμούς και παράσιτα, επιδεινώνοντας τους κινδύνους για την υδατοκαλλιέργεια (DeNicola et al., 2015; Moussa et al., 2025). Αυτά τα αλληλένδετα ζητήματα επηρεάζουν σημαντικά τη βιωσιμότητα και την κερδοφορία της υδατοκαλλιέργειας.

Η γεωγραφική κατανομή των ζωνών υδατοκαλλιέργειας αναδιαμορφώνεται λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η άνοδος της θερμοκρασίας της θάλασσας, η μετατόπιση των ωκεάνιων ρευμάτων και η αλλαγή των κατακρημνισμάτων μεταβάλλουν την καταλληλότητα των παραδοσιακών περιοχών υδατοκαλλιέργειας. Η μετατόπιση αυτή απαιτεί στρατηγικές προσαρμογές, όπως η μετεγκατάσταση των δραστηριοτήτων σε νέες κατάλληλες ζώνες, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που θέτουν τα χωροκατακτητικά είδη, τα οποία ευδοκιμούν σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και διαταράσσουν τα ενδημικά οικοσυστήματα. Οι διαταραχές αυτές συνεπάγονται σημαντικές κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες και απαιτούν άμεση προσοχή από τους φορείς χάραξης πολιτικής, τους ερευνητές και τους ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου.

1. Επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην ποιότητα των υδάτων

1.1. Θερμική διαστρωμάτωση και μείωση του οξυγόνου στα υδάτινα οικοσυστήματα

Μηχανισμοί θερμικής στρωμάτωσης και εξάντλησης οξυγόνου.

Η θερμική διαστρωμάτωση συμβαίνει όταν οι διαφορές στη θερμοκρασία του νερού δημιουργούν διακριτά στρώματα μέσα σε ένα υδάτινο σώμα. Η διαδικασία αυτή επιδεινώνεται από την υπερθέρμανση του πλανήτη, καθώς η άνοδος της επιφανειακής θερμοκρασίας εντείνει το διαχωρισμό μεταξύ του θερμότερου, ελαφρύτερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου, πυκνότερου βαθιού νερού. Αυτά τα στρώματα εμποδίζουν την κατακόρυφη ανάμιξη, περιορίζοντας την καθοδική κίνηση του οξυγόνου και την ανοδική κίνηση των θρεπτικών ουσιών. Κατά συνέπεια, τα επίπεδα οξυγόνου στα βαθύτερα ύδατα μειώνονται, οδηγώντας σε υποξία ή ανοξικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν σοβαρά τα θαλάσσια οικοσυστήματα (Bhuiyan et al., 2024; Burke et al., 2022).

Η μείωση του οξυγόνου ήταν ιδιαίτερα εμφανής σε περιοχές με ασθενή αερισμό και υψηλή αποσύνθεση οργανικής ύλης. Για παράδειγμα, ο ανατολικός τροπικός Ειρηνικός (ETP) και η Αραβική Θάλασσα παρουσιάζουν εκτεταμένες ζώνες ελάχιστου οξυγόνου (OMZ), όπου τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου είναι κάτω από 20 $\mu\text{mol/L}$, σε βάθη 100 έως 1.000 μέτρων. Οι περιοχές αυτές αναδεικνύουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της αργής ωκεάνιας κυκλοφορίας, της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και της περιορισμένης αναπλήρωσης του οξυγόνου (Bhuiyan et al., 2024).



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Περιφερειακές και παγκόσμιες τάσεις

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η περιεκτικότητα των ωκεανών σε οξυγόνο έχει μειωθεί κατά περίπου 2% από το 1960. Η τάση αυτή αποδίδεται στην εντεινόμενη στρωματοποίηση, τον ευτροφισμό και την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι παράκτιες περιοχές, συμπεριλαμβανομένου του Κόλπου του Μεξικού και του Κόλπου Τσέξαπικ, έχουν βιώσει σημαντική επέκταση των υποξικών ζωνών, που συνήθως αναφέρονται ως "νεκρές ζώνες". Οι περιοχές αυτές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην απορροή θρεπτικών ουσιών, η οποία τροφοδοτεί την άνθιση των φυκών, οδηγώντας σε αυξημένη αποσύνθεση οργανικής ύλης και κατανάλωση οξυγόνου (Bhuiyan et al., 2024).

Τα δορυφορικά μοντέλα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη δυναμική του διαλυμένου οξυγόνου, δείχνοντας πώς οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της αλατότητας συσχετίζονται με τα επίπεδα οξυγόνου. Για παράδειγμα, οι περιοχές που επηρεάζονται από ανοδικές κινήσεις, όπως το ρεύμα της Καλιφόρνιας, αποκαλύπτουν υψηλότερη μεταβλητότητα του οξυγόνου λόγω της αλληλεπίδρασης των πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά ψυχρών υδάτων και της βιολογικής παραγωγικότητας (Sundararaman & Shanmugam, 2024).

Επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή

Η μείωση του οξυγόνου επηρεάζει άμεσα τα υδρόβια είδη μειώνοντας τις κατοικήσιμες ζώνες και μεταβάλλοντας τη δυναμική του οικοσυστήματος. Οι βενθικοί οργανισμοί και η βενθική πανίδα υποφέρουν περισσότερο, καθώς δεν μπορούν να ξεφύγουν από τις συνθήκες χαμηλού οξυγόνου. Τα ψάρια και τα κινητά ασπόνδυλα αντιμετωπίζουν συμπίεση των ενδιαιτημάτων τους, αναγκάζοντάς τα σε ρηχότερα στρώματα πλούσια σε οξυγόνο, γεγονός που αυξάνει τον ανταγωνισμό και τον κίνδυνο θήρευσης. Επιπλέον, η παρατεταμένη υποξία μπορεί να διαταράξει την αναπαραγωγή και την ανάπτυξη, οδηγώντας σε μείωση των πληθυσμών των εμπορικά σημαντικών ειδών (Burke et al., 2022- Sundararaman & Shanmugam, 2024).

Στρατηγικές μετριασμού.

1. Ενισχυμένη παρακολούθηση: Οι εξελίξεις στην τηλεπισκόπηση και τα βιογεωχημικά μοντέλα παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη δυναμική του οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών, βοηθώντας στην έγκαιρη ανίχνευση υποξικών συνθηκών.
2. Διαχείριση θρεπτικών στοιχείων: Η μείωση της γεωργικής απορροής και η εφαρμογή βιώσιμων γεωργικών πρακτικών μπορούν να μετριάσουν τον ευτροφισμό και τη συναφή μείωση του οξυγόνου.
3. Συστήματα οξυγόνωσης: Στην υδατοκαλλιέργεια, τεχνολογίες όπως η έγχυση υγρού οξυγόνου και τα συστήματα αερισμού έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανακούφιση του στρες χαμηλού οξυγόνου σε ιχθυοκαλλιέργειες, με μικτή επιτυχία ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Burke et al., 2022).
4. Μετριασμός της κλιματικής αλλαγής: Η αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτίων της υπερθέρμανσης του πλανήτη μέσω μειωμένων εκπομπών άνθρακα είναι κρίσιμη για την αντιστροφή των τάσεων διαστρωμάτωσης και τη διατήρηση της θαλάσσιας βιοποικιλότητας (Bhuiyan et al., 2024).



1.2. Αύξηση της θερμοκρασίας, μεταβολικές και αυξητικές αλλαγές

Μεταβολικοί ρυθμοί και ζήτηση οξυγόνου

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επηρεάζουν άμεσα τους μεταβολικούς ρυθμούς των υδρόβιων οργανισμών, οδηγώντας σε αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Μελέτες δείχνουν ότι η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία υποξία αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς η διαθεσιμότητα του οξυγόνου μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, περιορίζοντας έτσι τις αερόβιες ικανότητες των οργανισμών (Seibel, 2024). Για παράδειγμα, ο μεταβολικός δείκτης καταδεικνύει ότι η παροχή οξυγόνου καθίσταται ανεπαρκής για την κάλυψη της ζήτησης σε υψηλότερες θερμοκρασίες, περιορίζοντας την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή (Deutsch et al., 2020).

Τα είδη ψαριών είναι ιδιαίτερα ευάλωτα, καθώς οι αυξημένοι μεταβολικοί ρυθμοί απαιτούν μεγαλύτερη πρόσληψη οξυγόνου, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε θερμότερα νερά με μειωμένη διαλυτότητα οξυγόνου. Αυτή η φυσιολογική καταπόνηση δεν εμποδίζει μόνο την ανάπτυξη αλλά επηρεάζει επίσης τα ποσοστά επιβίωσης, ιδίως για τα είδη που ζουν σε ρηχά ή θερμικά στρωματοποιημένα περιβάλλοντα (Okon et al., 2024).

Ανάπτυξη και αναπαραγωγικές προκλήσεις

Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας μεταβάλλουν σημαντικά τις πορείες ανάπτυξης και τους αναπαραγωγικούς κύκλους των υδρόβιων ειδών. Για πολλά ψάρια, τα θερμότερα νερά οδηγούν σε πρόωγη ωρίμανση αλλά σε μικρότερη διάρκεια ζωής, διαταράσσοντας τη δυναμική των πληθυσμών και τις ισορροπίες των οικοσυστημάτων (Liu et al., 2024). Επιπλέον, οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητα των γαμετών και την επιτυχία της αναπαραγωγής, μειώνοντας την αναπαραγωγική παραγωγή. Για παράδειγμα, είδη στον βορειοδυτικό Ειρηνικό έχουν παρουσιάσει αλλαγές στις στρατηγικές αναπαραγωγής τους ως άμεση απόκριση στη μεταβολή του θερμικού καθεστώτος, τονίζοντας τη βαθιά επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της ιστορίας ζωής (Liu et al., 2024).

Επιπτώσεις στην υγεία του οικοσυστήματος

Οι αλυσιδωτές επιπτώσεις των μεταβολικών αλλαγών και της ανάπτυξης επεκτείνονται στην ευρύτερη υγεία του οικοσυστήματος. Οι αυξημένοι μεταβολικοί ρυθμοί οδηγούν σε μεγαλύτερη πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και αποβολή αποβλήτων, γεγονός που μπορεί να επιδεινώσει τον ευτροφισμό σε πλούσια σε θρεπτικά συστατικά ύδατα. Επιπλέον, η θερμική καταπόνηση μπορεί να αποδυναμώσει τις ανοσολογικές αντιδράσεις, καθιστώντας τα είδη πιο ευάλωτα σε παθογόνους μικροοργανισμούς και ασθένειες, όπως παρατηρείται στα παγκόσμια συστήματα υδατοκαλλιέργειας (Okon et al., 2024). Αυτές οι αλληλεπιδράσεις υπογραμμίζουν την κρίσιμη ανάγκη για ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης για τον μετριασμό των στρεσογόνων παραγόντων που προκαλούνται από το κλίμα στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Προσαρμοστικές αντιδράσεις και στρατηγικές μετριασμού

Τα υδρόβια είδη παρουσιάζουν διάφορους βαθμούς φαινοτυπικής πλαστικότητας για την αντιμετώπιση της θερμικής καταπόνησης. Για παράδειγμα, τα ευρύαλλα είδη προσαρμόζουν τους



**Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα
σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"**

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

ωσμορυθμιστικούς μηχανισμούς τους για να διαχειρίζονται τις αυξημένες διακυμάνσεις της αλατότητας και της θερμοκρασίας (Esbaugh, 2025). Ωστόσο, η έκταση αυτών των προσαρμογών περιορίζεται από τους ενεργειακούς περιορισμούς, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία των προληπτικών μέτρων για τον μετριασμό των επιπτώσεων της θερμοκρασίας.

Οι αποτελεσματικές στρατηγικές περιλαμβάνουν την αποκατάσταση της παρόχθιας βλάστησης για τη σκίαση των υδάτινων σωμάτων και τη μείωση της θερμικής επιβάρυνσης, καθώς και την ενίσχυση της ροής του νερού σε στρωματοποιημένα συστήματα για τη βελτίωση της κατανομής του οξυγόνου. Επιπλέον, οι παγκόσμιες προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παραμένουν ουσιαστικές για την αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτιών της αύξησης της θερμοκρασίας που προκαλείται από το κλίμα (Seibel, 2024).

1.3. Οξίνιση των ωκεανών

Επίπεδα pH και οξίνιση των ωκεανών

Η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τους ωκεανούς αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα της οξίνισης των ωκεανών, προκαλώντας μετρήσιμη μείωση των επιπέδων του pH. Από την προβιομηχανική εποχή, το pH των επιφανειακών ωκεανών έχει μειωθεί κατά περίπου 0,1 μονάδες, που αντιστοιχεί σε αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου κατά 26% (Duarte et al., 2022). Αυτή η οξίνιση προκύπτει από την ένωση του CO_2 με το θαλασσίνο νερό προς σχηματισμό ανθρακικού οξέος, το οποίο διαχωρίζεται σε διττανθρακικά και ιόντα υδρογόνου, μειώνοντας το pH και μειώνοντας τη διαθεσιμότητα των ανθρακικών ιόντων (Grabba et al., 2024). Τα ανθρακικά ιόντα είναι απαραίτητα για τους ασβεστολιθικούς οργανισμούς, όπως τα οστρακοειδή και τα κοράλλια, για να οικοδομήσουν και να διατηρήσουν τις δομές ανθρακικού ασβεστίου τους. Η μειωμένη διαθεσιμότητα ανθρακικών έχει συνδεθεί με λεπτότερα, ασθενέστερα κελύφη και μειωμένη σκελετική ακεραιότητα σε θαλάσσια είδη (Andreyeva et al., 2024).

Επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή

Η οξίνιση των ωκεανών επηρεάζει σοβαρά τους ασβεστολιθικούς οργανισμούς, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές της κατάστασης κορεσμού των ανθρακικών αλάτων. Εργαστηριακές μελέτες σε δίθυρα, όπως τα μύδια και τα στρείδια, καταδεικνύουν ότι οι συνθήκες μειωμένου pH εμποδίζουν τον σχηματισμό του κελύφους, καθυστερούν την ανάπτυξη και αυξάνουν τα ποσοστά θνησιμότητας κατά τα πρώιμα στάδια της ζωής (Hamilton et al., 2022). Για παράδειγμα, το μύδι *Mytilus galloprovincialis* έχει δείξει ανθεκτικότητα σε χαμηλό pH, αλλά εξακολουθεί να εμφανίζει αυξημένους τραυματισμούς του κελύφους και μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης σε συνθήκες οξίνισης (Andreyeva et al., 2024). Τέτοιες φυσιολογικές καταπονήσεις θέτουν σε κίνδυνο την επιβίωση και τις επιδόσεις αυτών των ειδών τόσο στα φυσικά ενδιαίτηματα όσο και στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας.

Η οξίνιση των ωκεανών βλάπτει επίσης τα μη ασβεστολιθικά είδη, μεταβάλλοντας τις αισθητήριες λειτουργίες, την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή. Σε ψάρια και ασπόνδυλα έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στη συμπεριφορά, όπως μειωμένη αποφυγή θηρευτών και μεταβαλλόμενες προτιμήσεις ενδιαιτημάτων, σε συνθήκες χαμηλού pH (Grabba et al., 2024). Επιπλέον, η οξίνιση σε συνδυασμό



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

με άλλους στρεσογόνους παράγοντες, όπως η υποξία, επιδεινώνει αυτές τις αρνητικές επιδράσεις, οδηγώντας σε επιδεινούμενες επιπτώσεις στη θαλάσσια βιοποικιλότητα (Andreyeva et al., 2024).

Οικονομικές και οικολογικές συνέπειες

Οι οικονομικές επιπτώσεις της οξίνισης των ωκεανών είναι βαθιές, ιδίως για τις βιομηχανίες που εξαρτώνται από τους ασβεστολιθικούς οργανισμούς. Η αλιεία οστρακοειδών και η υδατοκαλλιέργεια αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις, με προβλεπόμενες απώλειες στην παραγωγή και την αξία της αγοράς λόγω της υποβαθμισμένης ποιότητας του κελύφους και των ποσοστών επιβίωσης (Mangi et al., 2018). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι οικονομικές απώλειες που αποδίδονται στην οξίνιση των ωκεανών θα μπορούσαν να κυμανθούν από 14% έως 28% της καθαρής παρούσας αξίας της αλιείας σε σενάρια υψηλών εκπομπών (Mangi et al., 2018). Αυτές οι οικονομικές πιέσεις υπογραμμίζουν τον επείγοντα χαρακτήρα της αντιμετώπισης της οξίνισης για τη διασφάλιση των θαλάσσιων πόρων και των μέσων διαβίωσης.

Από οικολογική άποψη, η διατάραξη των θαλάσσιων τροφικών πλεγμάτων αποτελεί κρίσιμη ανησυχία. Οι μειωμένοι πληθυσμοί ασβεστολιθικών οργανισμών μπορεί να έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις στη δυναμική θηρευτών-θηραμάτων, στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και στη συνολική σταθερότητα του οικοσυστήματος (Duarte et al., 2022). Ολοκληρωμένες προσεγγίσεις, όπως τα πολυτροφικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας, έχουν δείξει ότι υπόσχονται τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων με τη χρήση φυκιών για τη ρυθμιστική ρύθμιση των επιπέδων pH και την υποστήριξη των ασβεστολιθικών ειδών (Hamilton et al., 2022).

Στρατηγικές μετριασμού και μελλοντικές προοπτικές

Η αντιμετώπιση της οξίνισης των ωκεανών απαιτεί συντονισμένες παγκόσμιες προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών CO₂ και την εφαρμογή στρατηγικών προσαρμογής. Η αποκατάσταση των λιβαδιών θαλάσσιου χόρτου και των μαγγρόβιων φυτών μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των ακτών απορροφώντας το CO₂ και παρέχοντας καταφύγια για τους θαλάσσιους οργανισμούς (Hamilton et al., 2022). Επιπλέον, η προώθηση των πρακτικών υδατοκαλλιέργειας για την ενσωμάτωση τεχνικών απομόνωσης του pH, όπως η χρήση φυκιών, μπορεί να μετριάσει τον αντίκτυπο της οξίνισης στην καλλιέργεια οστρακοειδών (Hamilton et al., 2022).

Η μακροχρόνια παρακολούθηση και έρευνα είναι απαραίτητες για την κατανόηση των πολύπλευρων επιπτώσεων της οξίνισης και την ανάπτυξη αποτελεσματικών πολιτικών. Η ενισχυμένη διεθνής συνεργασία και η ενσωμάτωση των επιστημονικών πορισμάτων σε πλαίσια πολιτικής, όπως το Παγκόσμιο Πλαίσιο Βιοποικιλότητας του Κουνμίνγκ-Μοντρεάλ, είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της οξίνισης και την προστασία της θαλάσσιας βιοποικιλότητας (Grabba et al., 2024).

1.4. Αλλαγές στην αλατότητα

Μηχανισμοί που οδηγούν σε αλλαγές αλατότητας

Οι κύριες αιτίες των διακυμάνσεων της αλατότητας περιλαμβάνουν τις εισροές γλυκού νερού από το λιώσιμο των παγετώνων, τις αυξημένες βροχοπτώσεις και τις εποχιακές διακυμάνσεις της εκροής των ποταμών. Για παράδειγμα, στον Βόρειο Κόλπο της Αλάσκας, οι εισροές γλυκού νερού από παγετώδεις λεκάνες απορροής συμβάλλουν σε έντονες εποχικές και χωρικές διακυμάνσεις της



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

αλατότητας. Οι μεταβολές αυτές διαμορφώνονται περαιτέρω από την ανάμιξη λόγω ανέμων και τα παράκτια ρεύματα, τα οποία επηρεάζουν την κατανομή των εκβολών γλυκού νερού (Reister et al., 2024). Παρομοίως, η Θάλασσα Βερίνγκ έχει υποστεί σημαντική ανανέωση λόγω της μειωμένης παραγωγής θαλάσσιου πάγου και των αυξημένων όγκων νερού τήξης, οδηγώντας σε αποδυνάμωση της στρωματοποίησης και μετατοπίσεις στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών (Mensah et al., 2025).

Επιπτώσεις στους θαλάσσιους και εκβολικούς οργανισμούς

Οι οργανισμοί που ζουν σε εκβολές ποταμών και παράκτιες περιοχές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις της αλατότητας. Για τα είδη που εξαρτώνται από τη σταθερή αλατότητα, όπως τα οστρακοειδή και συγκεκριμένοι πληθυσμοί ψαριών, οι μεταβολές της αλατότητας μπορούν να διαταράξουν τις φυσιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της ωσμωρύθμισης, της ανάπτυξης και της αναπαραγωγής (Guimbeau et al., 2024). Για παράδειγμα, μελέτες στο Μπαγκλαντές αποκαλύπτουν ότι η αυξημένη έκθεση στην αλατότητα κατά τη διάρκεια κρίσιμων αναπτυξιακών περιόδων οδηγεί σε καχεκτική ανάπτυξη των παιδιών, αναδεικνύοντας τις ευρύτερες κοινωνικο-οικολογικές συνέπειες των αλλαγών της αλατότητας (Guimbeau et al., 2024).

Τα εκβολικά συστήματα, όπως αυτά του Κόλπου Τσέζαπικ, αντιμετωπίζουν σύνθετη πίεση από τον εμπλουτισμό με θρεπτικά συστατικά και τις αλλαγές στην αλατότητα. Τα αυξημένα επίπεδα αλατότητας έχουν συνδεθεί με μειωμένη ποικιλότητα ειδών και αλλαγές στη σύνθεση της κοινότητας, καθώς τα λιγότερο ανεκτικά είδη αντικαθίστανται από ευκαιριακά είδη (Zhang et al., 2024). Αυτή η μείωση της βιοποικιλότητας έχει αλυσιδωτές επιπτώσεις στη σταθερότητα του τροφικού πλέγματος και στις υπηρεσίες του οικοσυστήματος.

Ευρύτερες οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές συνέπειες

Οι διακυμάνσεις της αλατότητας επηρεάζουν όχι μόνο τη βιοποικιλότητα αλλά και την παραγωγικότητα της παράκτιας αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, η διείσδυση αλμυρού νερού σε συστήματα γλυκού νερού μειώνει τη διαθεσιμότητα ενδιαιτημάτων κατάλληλων για είδη γλυκού και υφάλμυρου νερού. Στην υδατοκαλλιέργεια, η αυξομείωση της αλατότητας δυσχεραίνει τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών, επηρεάζοντας την ανάπτυξη και την επιβίωση των καλλιεργούμενων ειδών (Mensah et al., 2025).

Επιπλέον, οι αλλαγές αυτές επιδεινώνουν τα υφιστάμενα τρωτά σημεία των παράκτιων κοινοτήτων. Η μειωμένη γεωργική παραγωγικότητα σε περιοχές όπως το δέλτα του Γάγγη-Μπραχμαπούτρα έχει συνδεθεί με την αλάτωση του αρδευτικού νερού, υπογραμμίζοντας τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των διακυμάνσεων της αλατότητας (Guimbeau et al., 2024).

Στρατηγικές μετριασμού και προσαρμογής

Η αντιμετώπιση των επιπτώσεων των διακυμάνσεων της αλατότητας απαιτεί ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης. Η αποκατάσταση της παράκτιας βλάστησης, όπως τα μαγκρόβια και τα θαλάσσια χόρτα, μπορεί να αμβλύνει τις μεταβολές της αλατότητας σταθεροποιώντας τα ιζήματα και ενισχύοντας την κατακράτηση νερού. Επιπλέον, η βελτιωμένη μοντελοποίηση των εισροών γλυκού νερού και της δυναμικής της αλατότητας μπορεί να δώσει πληροφορίες για προσαρμοστικές



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

πρακτικές διαχείρισης, όπως η τροποποίηση των προγραμμάτων άρδευσης και η επιλογή ποικιλιών καλλιεργειών που αντέχουν στην αλμύρα (Zhang et al., 2024).

Σε ευρύτερη κλίμακα, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη για τον μετριασμό των υποκείμενων παραγόντων της κλιματικής αλλαγής. Οι επενδύσεις σε παγκόσμια συστήματα παρακολούθησης και τα σχέδια προσαρμογής σε κοινοτικό επίπεδο μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα στις μεταβολές της αλατότητας σε ευάλωτες περιοχές (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

1.5. Αλλαγές στην αλατότητα των ωκεάνιων υδάτων με αντίκτυπο στην κατανομή των θαλάσσιων ειδών

Μηχανισμοί των μετατοπίσεων κατανομής που προκαλούνται από την αλατότητα

Οι διακυμάνσεις της αλατότητας οφείλονται κυρίως στις εισροές γλυκού νερού, στο λιώσιμο των παγετώνων και στις μεταβαλλόμενες βροχοπτώσεις. Για παράδειγμα, οι παράκτιες περιοχές κοντά σε εκβολές ποταμών παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση της αλατότητας λόγω εποχιακών και κλιματικών αλλαγών (Guimbeau et al., 2024). Στις εκβολές της Δυτικής Αυστραλίας, η υπεραλατότητα αναπτύσσεται όταν οι εισροές γλυκού νερού μειώνονται και η εξάτμιση υπερβαίνει τις εισροές νερού, αναγκάζοντας τα είδη να μεταναστεύσουν σε λιγότερο αλατούχες περιοχές ή να αντιμετωπίσουν μείωση του πληθυσμού τους (Hoeksema et al., 2023).

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί παρουσιάζουν διαφορετική ανοχή στις μεταβολές της αλατότητας, γεγονός που επηρεάζει την κατανομή τους. Τα ευρύαλα είδη, ικανά να προσαρμόζονται σε μεγάλα εύρη αλατότητας, κυριαρχούν σε περιοχές με κυμαινόμενη αλατότητα. Ωστόσο, τα στενόαλα είδη, τα οποία απαιτούν σταθερά επίπεδα αλατότητας, συχνά υποχωρούν σε καταφύγια ή υφίστανται πληθυσμιακές μειώσεις όταν η αλατότητα αποκλίνει από τα βέλτιστα επίπεδα (Rahman & Hung, 2024).

Επιπτώσεις στην κατανομή των ειδών και την υδατοκαλλιέργεια

Οι μεταβολές της αλατότητας μεταβάλλουν σημαντικά τη χωρική κατανομή των θαλάσσιων ειδών. Για παράδειγμα, η βαθύβια γαρίδα *Parapenaeus longirostris* στη Μεσόγειο Θάλασσα έχει μετατοπίσει το εύρος εξάπλωσής της ως απάντηση στην αύξηση της θερμοκρασίας και την αλατοποίηση, με τους πληθυσμούς να μετακινούνται προς τα βόρεια και βαθύτερα για να αποφύγουν τις λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες (Mingote et al., 2024). Αυτές οι μετατοπίσεις διαταράσσουν τα τοπικά οικοσυστήματα και την αλιεία, μεταβάλλοντας τη δυναμική θηρευτών-θηραμάτων και τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Οι δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις λόγω της μεταβλητότητας της αλατότητας. Είδη όπως η τσιπούρα, τα οποία είναι ευαίσθητα στην αλατότητα κατά την αναπαραγωγή, παρουσιάζουν μειωμένη κινητικότητα του σπέρματος και επιτυχία της γονιμοποίησης σε μη βέλτιστες συνθήκες αλατότητας. Αυτό επηρεάζει τις λειτουργίες των εκκολαπτηρίων και τη βιωσιμότητα των πρακτικών υδατοκαλλιέργειας (Rahman & Hung, 2024). Στο Μπαγκλαντές, η προοδευτική αλάτωση έχει περιορίσει την παραγωγικότητα της υδατοκαλλιέργειας και έχει οδηγήσει σε αυξημένη κοινωνικοοικονομική ευπάθεια στις παράκτιες κοινότητες (Guimbeau et al., 2024).



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Ευρύτερες οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις

Οι αλλαγές στην κατανομή των ειδών λόγω αλατότητας έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις στις υπηρεσίες του οικοσυστήματος. Οι αλλαγές στη σύνθεση της κοινότητας επηρεάζουν τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, την πρωτογενή παραγωγή και τη σταθερότητα των θαλάσσιων τροφικών πλεγμάτων (Hoeksema et al., 2023). Για παράδειγμα, καθώς αναπτύσσεται υπεραλατότητα στις εκβολές των ποταμών, η αφθονία των ειδών που κατοικούν στις εκβολές μειώνεται, οδηγώντας σε μειωμένη βιοποικιλότητα και αλλοιωμένη λειτουργία του οικοσυστήματος.

Από οικονομική άποψη, η αλιεία που εξαρτάται από συγκεκριμένα είδη αντιμετωπίζει αβεβαιότητες καθώς οι πληθυσμοί-στόχοι μεταναστεύουν σε λιγότερο προσβάσιμες περιοχές. Αυτό έχει παρατηρηθεί στη Μεσόγειο, όπου οι αλλαγές στην αλατότητα και τη θερμοκρασία έχουν επηρεάσει τη διαθεσιμότητα οικονομικά πολύτιμων ειδών, όπως η γαρίδα rose (Mingote et al., 2024). Επιπλέον, οι διακυμάνσεις της αλατότητας θέτουν προκλήσεις για την υδατοκαλλιέργεια, καθιστώντας αναγκαίες τις επενδύσεις σε προσαρμοστικές υποδομές και πρακτικές για τον μετριασμό των επιπτώσεων στην παραγωγή.

Στρατηγικές μετριασμού και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η αντιμετώπιση των επιπτώσεων των αλλαγών της αλατότητας στην κατανομή των θαλάσσιων ειδών απαιτεί ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης. Οι προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τη σταθεροποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η αποκατάσταση της παράκτιας βλάστησης, όπως τα μαγκρόβια και τα θαλάσσια λιβάδια, μπορεί να αμβλύνει τις αλλαγές της αλατότητας και να παρέχει ενδιαιτήματα για τους θαλάσσιους οργανισμούς (Guimbeau et al., 2024).

Οι επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας μπορούν να επωφεληθούν από τεχνολογικές καινοτομίες, όπως τα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιέργειας (RAS) και η επιλεκτική εκτροφή ειδών ανθεκτικών στην αλμύρα. Η βελτιωμένη παρακολούθηση και τα μοντέλα πρόβλεψης των αλλαγών της αλατότητας μπορούν επίσης να ενημερώσουν τις στρατηγικές προσαρμοστικής διαχείρισης, εξασφαλίζοντας την ανθεκτικότητα της υδατοκαλλιέργειας και της αλιείας στις προκλήσεις που προκαλούνται από την αλατότητα (Rahman & Hung, 2024).

1.6. Εισαγωγή θρεπτικών συστατικών και ευτροφισμός

Μηχανισμοί φόρτωσης θρεπτικών συστατικών και ευτροφισμού

Τα πλεονάζοντα θρεπτικά συστατικά, ιδίως το άζωτο και ο φώσφορος, εισάγονται στα υδάτινα συστήματα μέσω της απορροής από τις γεωργικές εκτάσεις, τα αστικά λύματα και τα βιομηχανικά απόβλητα. Αυτά τα θρεπτικά συστατικά προωθούν την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού και των φυκών, οδηγώντας σε ανθίσεις φυκών που μειώνουν τα επίπεδα οξυγόνου καθώς αποσυντίθενται (Reister et al., 2024). Στον Κόλπο του Μεξικού, η επιβάρυνση με θρεπτικά συστατικά από τη λεκάνη του ποταμού Μισισσιπή έχει δημιουργήσει μία από τις μεγαλύτερες υποξικές ζώνες παγκοσμίως, επηρεάζοντας την αλιεία και τη βιοποικιλότητα (Day et al., 2024).

Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει τη φόρτιση με θρεπτικά συστατικά μέσω της αύξησης των βροχοπτώσεων και των ακραίων καιρικών φαινομένων, τα οποία ενισχύουν την απορροή θρεπτικών



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

συστατικών στα υδάτινα σώματα. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες συμβάλλουν περαιτέρω στον ευτροφισμό επιταχύνοντας την ανάπτυξη των φυκών και μεταβάλλοντας τη δυναμική των οικοσυστημάτων (Mensah et al., 2025). Αυτές οι σύνθετες επιδράσεις εντείνουν τη συχνότητα και τη διάρκεια των HABs, οι οποίες απελευθερώνουν τοξίνες επιβλαβείς για τη θαλάσσια ζωή και την ανθρώπινη υγεία (Zhang et al., 2024).

Επιπτώσεις του ευτροφισμού

Ο ευτροφισμός επηρεάζει βαθιά τα υδάτινα οικοσυστήματα διαταράσσοντας τα τροφικά πλέγματα και μειώνοντας τη βιοποικιλότητα. Η εξάντληση του οξυγόνου, ή υποξία, αναγκάζει τα ψάρια και τα ασπόνδυλα να μεταναστεύσουν ή να αντιμετωπίσουν θνησιμότητα, ενώ τα βενθικά ενδιαιτήματα υποφέρουν από ανοξία των ιζημάτων (Reister et al., 2024). Για παράδειγμα, μελέτες στον κόλπο Chesapeake Bay αποκαλύπτουν σημαντική μείωση των πληθυσμών ψαριών λόγω επαναλαμβανόμενων υποξικών φαινομένων (Zhang et al., 2024).

Οι επιβλαβείς ανθίσεις φυκών θέτουν πρόσθετες προκλήσεις, καθώς παράγουν τοξίνες που επηρεάζουν τους θαλάσσιους οργανισμούς και τους ανθρώπινους πληθυσμούς. Είδη όπως η **Karenia brevis** και η **Microcystis aeruginosa** έχουν συνδεθεί με μαζικούς θανάτους ψαριών, μόλυνση οστρακοειδών και αναπνευστικά προβλήματα στον άνθρωπο (Mensah et al., 2025). Οι οικονομικές απώλειες από τους HABs είναι σημαντικές, ιδίως για την αλιεία, τον τουρισμό και τη δημόσια υγεία.

Στρατηγικές μετριασμού

Ο αποτελεσματικός μετριασμός της θρεπτικής επιβάρυνσης και του ευτροφισμού απαιτεί ολοκληρωμένη διαχείριση των λεκανών απορροής και παρεμβάσεις πολιτικής. Η μείωση της γεωργικής απορροής μέσω βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, όπως η καλλιέργεια με κάλυψη, οι ρυθμιστικές ζώνες και η λίπανση ακριβείας, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εισροές θρεπτικών ουσιών (Reister et al., 2024). Οι αστικές περιοχές μπορούν να επωφεληθούν από προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων που απομακρύνουν την περίσσεια θρεπτικών ουσιών πριν από την απόρριψη.

Η αποκατάσταση των υδροτόπων και των παρόχθιων ζωνών προσφέρει φυσικές λύσεις φιλτράροντας τα θρεπτικά συστατικά και βελτιώνοντας την ποιότητα του νερού. Επιπλέον, η δημόσια εκπαίδευση και οι μεταρρυθμίσεις πολιτικής, συμπεριλαμβανομένων των κανονισμών για τη διαχείριση των θρεπτικών ουσιών και των κινήτρων για βιώσιμες πρακτικές, είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτιών του ευτροφισμού (Day et al., 2024).

1.7. Ξηρασία, λειψυδρία και υποβαθμισμένη ποιότητα νερού

Παράγοντες της ξηρασίας και της λειψυδρίας

Οι ξηρασίες οφείλονται κυρίως σε κλιματικές μεταβολές, όπως η μείωση των βροχοπτώσεων και η άνοδος της θερμοκρασίας, που εντείνουν την εξατμισοδιαπνοή. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η μη βιώσιμη απόληψη νερού και η υποβάθμιση της γης, επιδεινώνουν περαιτέρω αυτά τα φυσικά φαινόμενα (Zucca et al., 2021). Για παράδειγμα, σε άνυδρες περιοχές όπως η Σαουδική Αραβία, δεκαετίες υπεράντλησης υπόγειων υδάτων και κακές πρακτικές άρδευσης έχουν εξαντλήσει



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

κρίσιμους υδροφορείς, επιδεινώνοντας τις επιπτώσεις της φυσικής λειψυδρίας (DeNicola et al., 2015).

Η κλιματική αλλαγή ενισχύει αυτές τις προκλήσεις μεταβάλλοντας τα πρότυπα βροχόπτωσης, οδηγώντας σε συχνότερες και σοβαρότερες ξηρασίες. Οι χώρες του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου (ΣΣΚ), οι οποίες χαρακτηρίζονται από υπερξηρό κλίμα, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες. Η ταχεία αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού στις περιοχές αυτές αυξάνουν τη ζήτηση νερού, επιβαρύνοντας τους ήδη περιορισμένους πόρους. Καινοτόμες στρατηγικές, όπως η ανακύκλωση λυμάτων και η αφαλάτωση, έχουν υιοθετηθεί για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, αλλά παραμένουν ενεργοβόρες και περιβαλλοντικά επιβαρυντικές (Moussa et al., 2025).

Επιπτώσεις της υποβαθμισμένης ποιότητας των υδάτων

Η υποβαθμισμένη ποιότητα των υδάτων συχνά συμπίπτει με τη λειψυδρία, καθώς οι περιορισμένοι πόροι μολύνονται όλο και περισσότερο από τις γεωργικές απορροές, τις βιομηχανικές απορρίψεις και τα αστικά λύματα. Για παράδειγμα, η υπερβολική φόρτωση θρεπτικών ουσιών στις λεκάνες απορροής ποταμών οδηγεί σε ευτροφισμό, επιβλαβείς ανθίσεις φυκιών και υποξικές συνθήκες, οι οποίες διαταράσσουν τα υδάτινα οικοσυστήματα και απειλούν τη βιοποικιλότητα (Giri, 2021). Στη Σαουδική Αραβία, τα ακραία καιρικά φαινόμενα που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή επιδεινώνουν τη μόλυνση των υδάτων, εισάγοντας παθογόνους μικροοργανισμούς και ρύπους στις πηγές γλυκού νερού (DeNicola et al., 2015).

Οι κοινωνικοοικονομικές συνέπειες της υποβαθμισμένης ποιότητας των υδάτων είναι βαθιές. Η κακή ποιότητα του νερού περιπλέκει τις διαδικασίες επεξεργασίας, αυξάνει το κόστος και υπονομεύει τη δημόσια υγεία. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι υδατογενείς ασθένειες που οφείλονται σε μολυσμένο πόσιμο νερό αποτελούν κύρια αιτία νοσηρότητας και θνησιμότητας, ιδίως σε κοινότητες με χαμηλό εισόδημα (Giri, 2021). Στο ΣΣΚ, οι μειώσεις της γεωργικής παραγωγής που οφείλονται στη λειψυδρία απειλούν την επισιτιστική ασφάλεια, καταδεικνύοντας τις αλυσιδωτές επιπτώσεις των προβλημάτων ποιότητας του νερού (Moussa et al., 2025).

Στρατηγικές μετριασμού

Η αντιμετώπιση των διπλών προκλήσεων της ξηρασίας και της υποβαθμισμένης ποιότητας των υδάτων απαιτεί ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που συνδυάζουν την τεχνολογική καινοτομία, τις μεταρρυθμίσεις πολιτικής και τη δέσμευση της κοινότητας. Οι πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων, όπως η συλλογή βρόχινου νερού και τα αποδοτικά συστήματα άρδευσης, είναι απαραίτητες για τη μείωση της εξάρτησης από τις υπερεκμεταλλευόμενες πηγές νερού (Moussa et al., 2025). Η αποκατάσταση φυσικών οικοσυστημάτων, όπως οι υγρότοποι, μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του νερού φιλτράροντας τους ρύπους και ρυθμίζοντας τους υδρολογικούς κύκλους (Zucca et al., 2021).

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία της αφαλάτωσης και της επεξεργασίας λυμάτων προσφέρουν πιθανές λύσεις για τις περιοχές με λειψυδρία. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές πρέπει να αναπτυχθούν με βιώσιμο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να διασφαλιστεί η προσβασιμότητα των ευάλωτων πληθυσμών. Η διεθνής συνεργασία και η ανάπτυξη ικανοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για την ανταλλαγή γνώσεων και πόρων για την αντιμετώπιση των υδατικών προκλήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο (DeNicola et al., 2015).



2. Επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην ευπάθεια των ειδών υδατοκαλλιέργειας

Εναισθησία στη θερμοκρασία και τρωτότητα των ειδών

Τα υδρόβια είδη εξαρτώνται από τις σταθερές θερμοκρασίες του νερού για τις φυσιολογικές και μεταβολικές τους διεργασίες. Οι αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη, την αναπαραγωγή και την επιβίωση. Για παράδειγμα, τα τροπικά είδη, όπως οι γαρίδες και οι τιλάπιες, είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, οι οποίες διαταράσσουν τις ενζυμικές δραστηριότητες και τη μεταβολική αποτελεσματικότητα (Giri, 2021). Μελέτες δείχνουν ότι η παρατεταμένη έκθεση σε θερμοκρασίες εκτός των ορίων ανοχής ενός είδους μπορεί να οδηγήσει σε θνησιμότητα λόγω στρες και σε χαμηλότερες αποδόσεις υδατοκαλλιέργειας (DeNicola et al., 2015).

Σε περιοχές όπως η Αραβική Χερσόνησος, όπου οι θερμοκρασίες των υδάτων αυξάνονται ταχύτερα από τον παγκόσμιο μέσο όρο, οι υδατοκαλλιέργειες αντιμετωπίζουν επιπρόσθετες προκλήσεις. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες όχι μόνο μειώνουν τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου αλλά αυξάνουν επίσης την τοξικότητα της αμμωνίας, απειλώντας περαιτέρω την υγεία των υδάτων (Moussa et al., 2025). Αυτές οι επιπτώσεις υπογραμμίζουν την ανάγκη για προσαρμοστικά μέτρα, όπως η επιλεκτική αναπαραγωγή για είδη ανθεκτικά στη θερμοκρασία και η ανάπτυξη συστημάτων υδατοκαλλιέργειας που ρυθμίζουν το θερμικό περιβάλλον.

Ασθένεια και πολλαπλασιασμός παρασίτων

Οι θερμότερες θερμοκρασίες νερού επιταχύνουν τον κύκλο ζωής των παθογόνων μικροοργανισμών και των παρασίτων, οδηγώντας σε συχνότερες και σοβαρότερες επιδημίες. Για παράδειγμα, ασθένειες που προκαλούνται από **Vibrio* spp.* και παράσιτα όπως οι θαλάσσιες ψείρες ευδοκιμούν σε αυξημένες θερμοκρασίες, προκαλώντας σημαντικές οικονομικές απώλειες στην υδατοκαλλιέργεια (Zucca et al., 2021). Η αυξημένη επικράτηση αυτών των απειλών έχει καταγραφεί σε εκτροφεία γαρίδων σε ολόκληρη τη Νοτιοανατολική Ασία και σε εκτροφεία σολομού στον Βόρειο Ατλαντικό, όπου η άνοδος της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας διευκόλυνε την εξάπλωση μολυσματικών ασθενειών (DeNicola et al., 2015).

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της δυναμικής των ασθενειών περιπλέκεται περαιτέρω από τις κλιματικά επαγόμενες αλλαγές στη χημεία του νερού, όπως η οξίνιση και η μετατόπιση της αλατότητας. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να αποδυναμώσουν την αντίσταση του ξενιστή, καθιστώντας τα είδη πιο ευάλωτα στις λοιμώξεις (Giri, 2021). Η αποτελεσματική διαχείριση των ασθενειών στην υδατοκαλλιέργεια απαιτεί, επομένως, έναν συνδυασμό βελτιωμένων συστημάτων παρακολούθησης, μέτρων βιοασφάλειας και έρευνας για ανθεκτικά στην ασθένεια στελέχη.

Στρατηγικές μετριασμού και προσαρμογής

Η αντιμετώπιση των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην υδατοκαλλιέργεια απαιτεί προληπτικές και ολοκληρωμένες στρατηγικές. Οι τεχνολογικές καινοτομίες, όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακυκλοφορία (RAS) και οι λίμνες με ελεγχόμενη θερμοκρασία, μπορούν να μετριάσουν τη θερμική καταπόνηση των υδρόβιων ειδών (Moussa et al., 2025). Επιπλέον, η



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

εφαρμογή προγραμμάτων εμβολιασμού και η εξέλιξη των τεχνολογιών ανίχνευσης ασθενειών μπορούν να συμβάλουν στη διαχείριση των κινδύνων από παθογόνους παράγοντες.

Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι ενδιαφερόμενοι φορείς πρέπει επίσης να δώσουν προτεραιότητα στη διατήρηση του περιβάλλοντος για τη σταθεροποίηση των οικοσυστημάτων. Η αποκατάσταση των μαγκρόβια και των υγροτόπων, για παράδειγμα, μπορεί να προστατεύσει τις υδατοκαλλιέργειες από τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και να παρέχει φυσικό φιλτράρισμα για τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για πρακτικές υδατοκαλλιέργειας ανθεκτικές στο κλίμα θα είναι απαραίτητη για τη διατήρηση αυτής της ζωτικής σημασίας βιομηχανίας υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Zucca et al., 2021).

2.1. Οικονομικές συνέπειες του αντίκτυπου της υπερθέρμανσης του πλανήτη στις υδατοκαλλιέργειες

Μειωμένες αποδόσεις θαλασσινών και ψαριών

Η υπερθέρμανση του πλανήτη διαταράσσει την ισορροπία των υδάτινων οικοσυστημάτων, επηρεάζοντας άμεσα τους πληθυσμούς των ψαριών και των οστρακοειδών. Η άνοδος της θερμοκρασίας της θάλασσας, η οξίνιση και η αλλαγή των ωκεάνιων ρευμάτων μεταβάλλουν τα ενδιαιτήματα και τη φυσιολογία των υδρόβιων ειδών. Για παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών μειώνει τη διαθεσιμότητα οξυγόνου στο νερό, προκαλώντας στρες στη θαλάσσια ζωή και οδηγώντας σε χαμηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης και αναπαραγωγικής επιτυχίας (Baag & Mandal, 2022). Αυτοί οι στρεσογόνοι παράγοντες οδηγούν σε σημαντική μείωση των ιχθυαποθεμάτων και των αποδόσεων οστρακοειδών, με αλυσιδωτές επιπτώσεις στην κερδοφορία των υδατοκαλλιεργειών (Doney et al., 2009).

Οι συνδυασμένες επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας και της οξίνισης επηρεάζουν σημαντικά τις διαδικασίες ασβεστοποίησης στα οστρακοειδή, όπως τα στρείδια και τα μύδια. Τα μειωμένα επίπεδα pH εμποδίζουν την ανάπτυξη και την επιβίωσή τους, θέτοντας σε κίνδυνο τη διαθεσιμότητά τους για την υδατοκαλλιέργεια. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι ασβεστοποιητικοί οργανισμοί είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στη μείωση των συγκεντρώσεων ανθρακικών ιόντων που προκαλείται από την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO₂ (Nienhuis et al., 2010). Ως αποτέλεσμα, οι φορείς υδατοκαλλιέργειας αντιμετωπίζουν τη διπλή πρόκληση του μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της διατήρησης των επιπέδων παραγωγής.

Πτώση της ποιότητας του νερού και ξεσπάσματα ασθενειών

Η ποιότητα του νερού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την υδατοκαλλιέργεια και η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει την υποβάθμισή της. Οι αυξημένες θερμοκρασίες της θάλασσας ευνοούν τον πολλαπλασιασμό των επιβλαβών ανθίσεων φυκών (HAB), οι οποίες μειώνουν τα επίπεδα οξυγόνου και απελευθερώνουν τοξίνες επιβλαβείς για τα υδρόβια είδη. Αυτές οι ανθίσεις, που οδηγούνται από την πλούσια σε θρεπτικά συστατικά απορροή και την αύξηση της θερμοκρασίας των υδάτων, έχουν συνδεθεί με μαζικούς θανάτους ψαριών και οικονομικές απώλειες στην υδατοκαλλιέργεια (USEPA, 2014).



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Επιπλέον, οι υψηλότερες θερμοκρασίες νερού επιταχύνουν την εξάπλωση ασθενειών μεταξύ των υδρόβιων ειδών. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί ευδοκιμούν σε θερμότερες συνθήκες, οδηγώντας σε αυξημένα κρούσματα ασθενειών στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, μελέτες σχετικά με την υδατοκαλλιέργεια στρειδιών αποκαλύπτουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αποδυναμώνει την ανοσία των στρειδιών και αυξάνει την ευαισθησία τους σε λοιμώξεις, μειώνοντας τα ποσοστά επιβίωσης και την παραγωγή (Neokye et al., 2024). Αυτοί οι παράγοντες μειώνουν συλλογικά την οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων υδατοκαλλιέργειας αυξάνοντας τα ποσοστά θνησιμότητας και το κόστος θεραπείας.

Κόστος προσαρμογής

Η προσαρμογή στις προκλήσεις που προκαλούνται από το κλίμα απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και πρακτικές διαχείρισης. Οι εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας πρέπει να ενσωματώνουν ανθεκτικές τεχνολογίες, όπως συστήματα ελεγχόμενης θερμοκρασίας και είδη ανθεκτικά στις ασθένειες, για να διατηρήσουν τα επίπεδα παραγωγής. Ωστόσο, αυτές οι προσαρμογές έχουν σημαντικό κόστος, το οποίο μπορεί να επιβαρύνει τους οικονομικούς πόρους των φορέων υδατοκαλλιέργειας, ιδίως σε περιοχές με χαμηλό εισόδημα (Naylor et al., 2023).

Η ανάγκη για προσαρμοστικά μέτρα υπογραμμίζεται περαιτέρω από τη μεταβαλλόμενη γεωγραφική κατανομή των κατάλληλων περιοχών υδατοκαλλιέργειας. Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και τα ακραία καιρικά φαινόμενα αναγκάζουν τη μετεγκατάσταση των επιχειρήσεων υδατοκαλλιέργειας σε περιοχές με πιο σταθερές συνθήκες, προσθέτοντας το κόστος μετεγκατάστασης στην οικονομική επιβάρυνση. Επιπλέον, οι πολιτικές που αποσκοπούν στον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως οι αυστηρότεροι κανονισμοί για τη διαχείριση των αποβλήτων και τη χρήση των πόρων, απαιτούν επενδύσεις σε μέτρα συμμόρφωσης και προηγμένες τεχνολογίες (Garlock et al., 2022).

Περιφερειακές και παγκόσμιες επιπτώσεις

Οι οικονομικές συνέπειες της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην υδατοκαλλιέργεια είναι άνισα κατανεμημένες. Οι περιοχές με ιδιαίτερα ευάλωτα οικοσυστήματα, όπως οι τροπικές περιοχές, αντιμετωπίζουν πιο έντονες προκλήσεις. Η υψηλή αλατότητα, η ξηρασία και τα χωροκατακτητικά είδη διαταράσσουν τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας, ιδίως για είδη όπως η γαρίδα και η τιλάπια. Αντίθετα, οι εύκρατες περιοχές βιώνουν σχετικά μέτριες επιπτώσεις, αλλά δεν είναι απρόσβλητες από τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η μεταβολή των κατακρημνισμάτων και η αύξηση της συχνότητας των καταιγίδων (Mahu et al., 2022).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ζήτηση για προϊόντα υδατοκαλλιέργειας συνεχίζει να αυξάνεται, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της ανάγκης για βιώσιμες πηγές πρωτεϊνών. Αυτό δημιουργεί μια παράδοξη κατάσταση, όπου ο τομέας της υδατοκαλλιέργειας πρέπει να αυξήσει την παραγωγή για να καλύψει τη ζήτηση, ενώ παράλληλα να αντιμετωπίσει το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Η αποτυχία αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων ενέχει τον κίνδυνο επιδείνωσης της επισιτιστικής ανασφάλειας και των οικονομικών ανισοτήτων (FAO, 2022).



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Πολιτική και Διακυβέρνηση

Τα αποτελεσματικά πλαίσια πολιτικής είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό των οικονομικών επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην υδατοκαλλιέργεια. Οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί πρέπει να εφαρμόσουν στρατηγικές για την υποστήριξη βιώσιμων πρακτικών και να προωθήσουν την έρευνα για ανθεκτικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, οι επενδύσεις στη γενετική έρευνα για την ανάπτυξη ανθεκτικών στο κλίμα ειδών και η δημιουργία συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για τους HAB μπορούν να μειώσουν τα τρωτά σημεία και να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα του τομέα (Handisyde et al., 2017).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των πολιτικών υδατοκαλλιέργειας σε ευρύτερα σχέδια δράσης για το κλίμα εξασφαλίζει μια συντονισμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Οι πολιτικές θα πρέπει να εξισορροπούν την οικονομική ανάπτυξη με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, επιτρέποντας στους φορείς υδατοκαλλιέργειας να προσαρμόζονται χωρίς να διακυβεύεται η οικολογική ακεραιότητα (Naylor et al., 2023).

2.2. Επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη στις γεωγραφικές μετατοπίσεις των υδατοκαλλιεργειών

Αλλαγή ζωνών: Υδατοκαλλιέργειες: Μετεγκατάσταση των κατάλληλων περιοχών υδατοκαλλιέργειας

Οι περιβαλλοντικές αλλαγές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή οδηγούν στη μετατόπιση των ζωνών υδατοκαλλιέργειας. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες των ωκεανών ωθούν τα είδη και τις δραστηριότητες προς τον πόλο, καθώς πολλές παραδοσιακές περιοχές υδατοκαλλιέργειας καθίστανται λιγότερο βιώσιμες λόγω της θερμικής καταπόνησης και της μειωμένης ποιότητας του νερού (Zarzyczny et al., 2024). Η τροπικοποίηση των θαλάσσιων περιβαλλόντων αποτελεί παράδειγμα αυτού του φαινομένου, όπου τροπικά είδη επεκτείνονται σε εύκρατες περιοχές, μεταβάλλοντας τις δομές των οικοσυστημάτων και δημιουργώντας νέες κοινότητες (Zarzyczny et al., 2024).

Εκτός από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, η μετατόπιση των κατακρημνισμάτων και η διαθεσιμότητα γλυκού νερού επηρεάζουν την υδατοκαλλιέργεια στην ενδοχώρα. Για παράδειγμα, η μειωμένη ροή νερού και η αυξημένη αλατότητα στις εκβολές των ποταμών επηρεάζουν την ανάπτυξη ειδών που εξαρτώνται από συγκεκριμένα επίπεδα αλατότητας (Priya et al., 2023). Ως αποτέλεσμα, οι επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας αντιμετωπίζουν αυξημένο κόστος που συνδέεται με τη μετεγκατάσταση σε περιοχές με πιο σταθερές και κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες (Mdoe et al., 2025). Η μετεγκατάσταση αυτή απαιτεί συχνά λεπτομερείς περιβαλλοντικές αξιολογήσεις για τον εντοπισμό περιοχών που μπορούν να υποστηρίξουν βιώσιμα την υδατοκαλλιέργεια, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την οικολογική υποβάθμιση.

Επιπλέον, η διαδικασία μετεγκατάστασης δεν είναι μόνο μια τεχνική πρόκληση αλλά και μια κοινωνικοοικονομική πρόκληση. Πολλές κοινότητες που εξαρτώνται από την υδατοκαλλιέργεια για τα προς το ζην μπορεί να αντιμετωπίσουν εκτοπισμό ή απώλεια θέσεων εργασίας εάν οι επιχειρήσεις απομακρυνθούν. Οι προσπάθειες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων απαιτούν τη συμμετοχή



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

των ενδιαφερόμενων μερών, προγράμματα επανεκπαίδευσης και υποστήριξη εναλλακτικών επιλογών διαβίωσης.

Χωροκατακτητικά είδη: Οικολογικές και λειτουργικές διαταραχές

Οι μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες επιτρέπουν τον πολλαπλασιασμό των χωροκατακτητικών ειδών, τα οποία ανταγωνίζονται τα ενδημικά είδη και διαταράσσουν τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, η τροπικοποίηση των εύκρατων ζωνών διευκολύνει την εγκατάσταση χωροκατακτητικών ειδών, όπως το λεοντόψαρο και ορισμένοι τύποι φυκών, τα οποία μπορούν να ανταγωνίζονται τους γηγενείς οργανισμούς και να υποβαθμίζουν την υγεία των οικοσυστημάτων (Woods et al., 2016). Αυτές οι εισβολές συχνά απαιτούν από τους φορείς υδατοκαλλιέργειας να εφαρμόζουν δαπανηρές στρατηγικές διαχείρισης για τη διατήρηση των επιπέδων παραγωγής.

Επιπλέον, η άφιξη διεισδυτικών παθογόνων μικροοργανισμών, η οποία διευκολύνεται από την άνοδο της θερμοκρασίας και το παγκόσμιο εμπόριο, αυξάνει τη συχνότητα εμφάνισης ασθενειών. Αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό για είδη υψηλής αξίας, όπως οι γαρίδες και ο σολομός, τα οποία είναι εύαλота σε μολύνσεις σε θερμότερα ύδατα (Ross et al., 2023). Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε μέτρα βιοασφάλειας, συμπεριλαμβανομένων των βελτιωμένων συστημάτων παρακολούθησης και της ανάπτυξης φυλών ανθεκτικών στα παθογόνα. Διερευνώνται προηγμένα βιοτεχνολογικά εργαλεία, όπως η γονιδιακή επεξεργασία με βάση το CRISPR, για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στις ασθένειες των ειδών υδατοκαλλιέργειας.

Τα χωροκατακτητικά είδη διαταράσσουν επίσης τη φυσική ισορροπία των οικοσυστημάτων, οδηγώντας σε απώλεια της βιοποικιλότητας. Για παράδειγμα, τα χωροκατακτητικά φύκια μπορούν να σχηματίσουν πυκνούς τάπητες που πνίγουν τους κοραλλιογενείς υφάλους και τα θαλάσσια λιβάδια, απαραίτητα ενδιαιτήματα για πολλούς θαλάσσιους οργανισμούς. Οι οικολογικές επιπτώσεις επεκτείνονται πέρα από την υδατοκαλλιέργεια, επηρεάζοντας την αλιεία, τον τουρισμό και τη συνολική θαλάσσια βιοποικιλότητα.

Στρατηγικές προσαρμογής

Η προσαρμογή σε αυτές τις προκλήσεις περιλαμβάνει ένα συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας, πολιτικής παρέμβασης και προσεγγίσεων με βάση το οικοσύστημα. Οι βασικές στρατηγικές περιλαμβάνουν:

1. Ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA): Με την ενσωμάτωση ειδών από διαφορετικά τροφικά επίπεδα, τα συστήματα IMTA μετριάζουν τις επιπτώσεις των χωροκατακτητικών ειδών και ενισχύουν την οικολογική ανθεκτικότητα (Mdoe et al., 2025). Η προσέγγιση αυτή μεγιστοποιεί επίσης την αποδοτικότητα των πόρων με την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών εντός του συστήματος.
2. Γενετικές βελτιώσεις: Η ανάπτυξη φυλών που είναι πιο ανθεκτικές στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και στις ασθένειες αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας των επιχειρήσεων υδατοκαλλιέργειας (Ross et al., 2023). Χρησιμοποιούνται προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής και γονιδιωμικά εργαλεία για τη δημιουργία στελεχών ψαριών και οστρακοειδών που μπορούν να ευδοκιμήσουν υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

3. Ενισχυμένα συστήματα παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης: Η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η προγνωστική μοντελοποίηση μπορούν να βοηθήσουν τους φορείς εκμετάλλευσης να προβλέψουν και να ανταποκριθούν στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών και στις επιδημίες χωροκατακτητικών ειδών (Wang et al., 2021). Για παράδειγμα, οι δορυφορικές εικόνες και οι αναλύσεις με βάση την τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την παρακολούθηση των θερμοκρασιών των ωκεανών, των ανθίσεων των φυκών και άλλων κρίσιμων παραμέτρων.

4. Πολιτική και κανονισμοί: Η εφαρμογή και η επιβολή ισχυρών πολιτικών που προωθούν βιώσιμες πρακτικές και προστατεύουν τη βιοποικιλότητα είναι ζωτικής σημασίας. Για παράδειγμα, οι πολιτικές που αποσκοπούν στη διαχείριση των χωροκατακτητικών ειδών και στην πρόληψη της εξάπλωσής τους μπορούν να μειώσουν τις οικολογικές και οικονομικές ζημιές (Priya et al., 2023). Τα συνεργατικά διεθνή πλαίσια, όπως οι στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, μπορούν να παρέχουν καθοδήγηση και υποστήριξη για τέτοιες προσπάθειες.

5. Κοινοτική δέσμευση: Η επιτυχής προσαρμογή απαιτεί τη συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Η ενδυνάμωση των κοινοτήτων μέσω πρωτοβουλιών εκπαίδευσης και ανάπτυξης ικανοτήτων διασφαλίζει ότι οι στρατηγικές προσαρμογής είναι τόσο αποτελεσματικές όσο και δίκαιες.

Περιφερειακές διαφορές στον αντίκτυπο

Οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στις ζώνες υδατοκαλλιέργειας διαφέρουν σημαντικά ανά περιοχή. Οι τροπικές περιοχές, οι οποίες αντιμετωπίζουν ήδη υψηλές θερμοκρασίες, αντιμετωπίζουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις, καθώς καθίστανται λιγότερο κατάλληλες για τα παραδοσιακά είδη υδατοκαλλιέργειας. Αντίθετα, στις εύκρατες περιοχές παρατηρείται εισροή τροπικών ειδών, γεγονός που παρουσιάζει ευκαιρίες για διαφοροποίηση, αλλά και κινδύνους που σχετίζονται με την ανισορροπία των οικοσυστημάτων (Zarzyczny et al., 2024).

Οι παράκτιες περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας και στα κύματα καταιγίδων, τα οποία προκαλούν ζημιές στις υποδομές υδατοκαλλιέργειας και διαταράσσουν τους κύκλους παραγωγής. Σε απάντηση, ορισμένες επιχειρήσεις μεταφέρονται σε εσωτερικές ή υπεράκτιες περιοχές με πιο σταθερές συνθήκες, αν και η μετάβαση αυτή συνεπάγεται σημαντικό κόστος και υλικοτεχνική πολυπλοκότητα (Woods et al., 2016). Η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, αν και πολλά υποσχόμενη, απαιτεί εξελίξεις στη μηχανική για να αντέξει στις σκληρές συνθήκες του ωκεανού και να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Περιφέρειες με ισχυρή διακυβέρνηση και ερευνητικές ικανότητες, όπως η Βόρεια Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική, είναι σε καλύτερη θέση να προσαρμοστούν σε αυτές τις προκλήσεις. Αντίθετα, οι περιοχές με χαμηλό εισόδημα, ιδίως στον Παγκόσμιο Νότο, αντιμετωπίζουν σημαντικά εμπόδια, συμπεριλαμβανομένης της περιορισμένης πρόσβασης σε χρηματοδότηση, τεχνολογία και εμπειρογνομosύνη. Η αντιμετώπιση αυτών των ανισοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της παγκόσμιας επισιτιστικής ασφάλειας και της δίκαιης ανάπτυξης.



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Περίληψη

Η θερμική στρωμάτωση και η μείωση του οξυγόνου αποτελούν σημαντικές απειλές για τα υδάτινα οικοσυστήματα, με εκτεταμένες οικολογικές και οικονομικές συνέπειες. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που οδηγούν σε αυτές τις αλλαγές είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού. Με την ενσωμάτωση των τεχνολογικών εξελίξεων και των βιώσιμων πρακτικών, οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στα υδάτινα συστήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα.

Οι αυξανόμενες παγκόσμιες θερμοκρασίες αποτελούν τρομερές προκλήσεις για τα υδρόβια είδη, καθώς αυξάνουν τις μεταβολικές απαιτήσεις και προκαλούν προβλήματα ανάπτυξης και αναπαραγωγής. Αυτές οι φυσιολογικές αλλαγές δεν απειλούν μόνο μεμονωμένα είδη αλλά θέτουν σε κίνδυνο και την ακεραιότητα του οικοσυστήματος. Η ολοκληρωμένη κατανόηση αυτών των δυναμικών, σε συνδυασμό με στοχευμένες προσπάθειες μετριασμού, είναι ζωτικής σημασίας για τη διαφύλαξη της υδάτινης βιοποικιλότητας και τη διατήρηση της ποιότητας των υδάτων σε ένα μεταβαλλόμενο κλίμα.

Οι διακυμάνσεις της αλατότητας που προκαλούνται από το κλίμα επηρεάζουν σημαντικά τα παράκτια και θαλάσσια οικοσυστήματα, διαταράσσοντας την κατανομή των ειδών και τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας, ενώ παράλληλα θέτουν προκλήσεις για τις εξαρτώμενες κοινότητες. Η αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που ενσωματώνει οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές εκτιμήσεις. Με την ιεράρχηση στρατηγικών προσαρμογής, συμπεριλαμβανομένων πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης και ισχυρών πλαισίων πολιτικής, είναι δυνατόν να μετριαστούν αυτές οι προκλήσεις και να διασφαλιστούν η βιοποικιλότητα και τα μέσα διαβίωσης.

Η επιβάρυνση με θρεπτικά συστατικά και ο ευτροφισμός παραμένουν κρίσιμες απειλές για τα υδάτινα οικοσυστήματα, οδηγώντας σε επιβλαβείς ανθίσεις φυκών, μείωση του οξυγόνου και υποβάθμιση των οικοσυστημάτων. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές μετριασμού πρέπει να επικεντρωθούν στη μείωση των εισροών θρεπτικών ουσιών, στην αποκατάσταση της ισορροπίας των οικοσυστημάτων και στην προώθηση της συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερομένων, των φορέων χάραξης πολιτικής και των επιστημόνων για την επίτευξη βιώσιμων αποτελεσμάτων.

Η λειψυδρία, η οποία επιδεινώνεται από την υπερθέρμανση του πλανήτη και τις ανθρώπινες δραστηριότητες, θέτει σημαντικές προκλήσεις για την παγκόσμια ασφάλεια των υδάτων. Οι ξηρασίες, οι απρόβλεπτες βροχοπτώσεις και η υποβαθμισμένη ποιότητα του νερού απειλούν τόσο τα οικοσυστήματα όσο και τους ανθρώπινους πληθυσμούς. Η ιεράρχηση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων, η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας και η εφαρμογή καινοτόμων λύσεων είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των προκλήσεων και την προστασία των ζωτικών υδάτινων πόρων για τις μελλοντικές γενιές.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζει επίσης σε μεγάλο βαθμό την υδατοκαλλιέργεια, αυξάνοντας την ευπάθεια των ειδών στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και κλιμακώνοντας τους κινδύνους από ασθένειες και παράσιτα. Οι προκλήσεις αυτές έχουν εκτεταμένες επιπτώσεις στην επισιτιστική ασφάλεια και την οικονομική σταθερότητα των παράκτιων κοινοτήτων. Οι συνεργατικές



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

προσπάθειες μεταξύ των ερευνητών, των φορέων χάραξης πολιτικής και των ενδιαφερόμενων φορέων του κλάδου είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων που ενισχύουν την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα του κλάδου της υδατοκαλλιέργειας.

Η γεωγραφική ανακατανομή των ζωνών υδατοκαλλιέργειας λόγω της κλιματικής αλλαγής απαιτεί προληπτικές στρατηγικές προσαρμογής. Η άνοδος της θερμοκρασίας της θάλασσας, η μετατόπιση των ρευμάτων και η αλλαγή των προτύπων βροχόπτωσης απαιτούν τη μετεγκατάσταση των δραστηριοτήτων και την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών. Η ενσωμάτωση της παραδοσιακής οικολογικής γνώσης με τις σύγχρονες επιστημονικές εξελίξεις μπορεί να δημιουργήσει ολιστικές λύσεις σε αυτές τις προκλήσεις, εξασφαλίζοντας την ανθεκτικότητα του κλάδου της υδατοκαλλιέργειας και τη συνεχή συμβολή του στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια.

Βιβλιογραφία

- Andreyeva, A. Y., Kukhareva, T. A., Gostyukhina, O. L., & Vialova, O. Y. (2024). Impacts of ocean acidification and hypoxia on cellular immunity, oxygen consumption, and antioxidant status in Mediterranean mussel. *Fish and Shellfish Immunology*, 154, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109932>
- Baag, S., & Mandal, S. (2022). Combined effects of ocean warming and acidification on marine fish and shellfish: A molecule to ecosystem perspective. *Science of the Total Environment*, 802, 149807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149807>
- Bhuiyan, M. M. U., Rahman, M., Naher, S., Shahed, Z. H., Ali, M. M., & Islam, A. R. M. T. (2024). Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Burke, M., Grant, J., Filgueira, R., & Swanson, A. (2022). Oxygenation effects on temperature and dissolved oxygen at a commercial Atlantic salmon farm. *Aquacultural Engineering*, 99, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102287>
- Day, J. W., Rybczyk, J. M., & Stephens, J. R. (2024). Climate change effects on nutrient loading and coastal eutrophication. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 6(18), 627–637. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00112-8>
- DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3), 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>
- Deutsch, C., Penn, J. L., & Seibel, B. A. (2020). Climate change constrains fish metabolic scope and habitat suitability globally. *Science Advances*, 6(22), eaax0194. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0194>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

- Duarte, J. A., Villanueva, R., Seijo, J. C., & Vela, M. A. (2022). Ocean acidification effects on aquaculture of a high resilient calcifier species: A bioeconomic approach. *Aquaculture*, 559, 738426. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738426>
- Esbaugh, A. J. (2025). Physiological responses of euryhaline marine fish to naturally-occurring hypersalinity. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 299, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2024.111768>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org>
- Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Kumar, G., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., & Tveterås, R. (2022). Aquaculture's role in sustainable food systems. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in the twenty-first century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies, and impediments. *Environmental Pollution*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Grabba, K. C., Ghosh, A., Adekunbi, F. O., Williamson, P., & Widdicombe, S. (2024). Ocean acidification: Causes, impacts, and policy actions. In *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 51–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14082-2.00011-9>
- Guimbeau, A., Ji, X. J., Long, Z., & Menon, N. (2024). Ocean salinity, early-life health, and adaptation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102954. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102954>
- Hamilton, S. L., Elliott, M. S., deVries, M. S., Adelaars, J., & Rintoul, M. D. (2022). Integrated multi-trophic aquaculture mitigates the effects of ocean acidification: Seaweeds raise system pH and improve growth of juvenile abalone. *Aquaculture*, 560, 738571. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738571>
- Handisyde, N., Ross, L. G., Badjeck, M.-C., & Allison, E. H. (2017). Climate change and aquaculture: Vulnerability and adaptation in the tropics. *Aquaculture*, 467, 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.012>
- Hoeksema, S. D., Chuwen, B. M., Tweedley, J. R., & Potter, I. C. (2023). Ichthyofaunas of nearshore, shallow waters of normally-closed estuaries are highly depauperate and influenced markedly by salinity and oxygen concentration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108410. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108410>
- Liu, S., Liu, Y., & Xing, Q. (2024). Climate change drives fish communities: Changing multiple facets of fish biodiversity in the Northwest Pacific Ocean. *Science of the Total Environment*, 955, 176854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176854>
- Mahu, E., et al. (2022). Climate-induced hazards and their impacts on aquaculture. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Mangi, S. C., Lee, J., Pinnegar, J. K., & Law, R. J. (2018). The economic impacts of ocean acidification on shellfish fisheries and aquaculture in the United Kingdom. *Environmental Science and Policy*, 86, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008>
- Mdoe, C. N., Mahonge, C. P., & Ngowi, E. E. (2025). Mapping the trends, knowledge production, and practices of climate-smart aquaculture. *Aquaculture*, 598, 741939. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741939>



Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

- Mensah, V., Chen, Y.-C., & Ohshima, K. I. (2025). Multidecadal decline in sea ice meltwater volume and implications for nutrient dynamics. *Progress in Oceanography*, 230, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103377>
- Mingote, M. G., Galimany, E., Sala-Coromina, J., Bahamon, N., Ribera-Altimir, J., Santos-Bethencourt, R., & Clavel-Henry, M. (2024). Warming and salinization effects on the deep-water rose shrimp, *Parapenaeus longirostris*, distribution along the NW Mediterranean Sea: Implications for bottom trawl fisheries. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115838>
- Moussa, L. G., Mohan, M., Arachchige, P. S. P., Rathnasekara, H., Abdullah, M., & Abulibdeh, A. (2025). Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. *Environmental Development*, 54, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101122>
- Naylor, R., et al. (2023). A global view of aquaculture policy. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Neokye, E. O., et al. (2024). Climate change impacts on oyster aquaculture: Part II. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Nienhuis, S., et al. (2010). Ocean acidification effects on calcifying organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 400, 287-302. <https://doi.org/10.3354/meps08307>
- Okon, E. M., Oyesiji, A. A., & Eissa, E. H. (2024). The escalating threat of climate change-driven diseases in fish: Evidence from a global perspective. *Environmental Research*, 263, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120184>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., & Sivarethinamohan, R. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystems. *Environmental Research*, 238, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>
- Rahman, M. M., & Hung, T.-C. (2024). Impact of salinity and body size on sperm motility in three California smelt species. *Aquaculture Reports*, 39, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102503>
- Reister, I., Danielson, S., & Aguilar-Islas, A. (2024). Perspectives on Northern Gulf of Alaska salinity field structure, freshwater pathways, and controlling mechanisms. *Progress in Oceanography*, 229, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103373>
- Ross, F. W. R., Boyd, P. W., & Filbee-Dexter, K. (2023). Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885, 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Seibel, B. A. (2024). On the validity of using the Metabolic Index to predict the responses of marine fishes to climate change. *Encyclopedia of Fish Physiology*, 3, 549-558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90801-6.00167-1>
- Sundararaman, H. K., & Shanmugam, P. (2024). Estimates of the global ocean surface dissolved oxygen and macronutrients from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114243>
- USEPA. (2014). Harmful algal blooms: Impacts on aquatic ecosystems. U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov>



Funded by
the European Union



**Ο ψηφιακός μπλε μεταφορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες στο πρόγραμμα
σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"**

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

- Wang, Y.-S., & Gu, J.-D. (2021). Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystems to global climate change. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 162, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105248>
- Woods, J. S., Veltman, K., & Huijbregts, M. A. J. (2016). Towards a meaningful assessment of marine ecological impacts in life cycle assessment. *Environment International*, 89–90, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.033>
- Zarzyczny, K. M., Rius, M., & Williams, S. T. (2024). The ecological and evolutionary consequences of tropicalisation. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(3), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.10.006>
- Zhang, T., Liu, H., Lu, Y., Wang, Q., & Loh, Y. C. (2024). Impact of climate change on coastal ecosystem and outdoor activities: A comparative analysis among four largest coastline covering countries. *Environmental Research*, 250, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118405>
- Zucca, C., Middleton, N., Kang, U., & Liniger, H. (2021). Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. *Catena*, 207, 105669. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669>