



Funded by
the European Union



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

Κεφάλαιο 6: Επιλογή συστήματος κατά της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην υδατοκαλλιέργεια

Αναπληρωτής καθηγητής Δρ Δημήτρης Κλαουδάτος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.)

1. Εισαγωγή

Η υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζει σημαντικά τα υδάτινα οικοσυστήματα και την υδατοκαλλιέργεια, καθιστώντας αναγκαία την υιοθέτηση ανθεκτικών συστημάτων για την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η εξάντληση του οξυγόνου και ο αυξημένος επιπολασμός ασθενειών. Οι βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων, με την επιλογή του συστήματος να διαδραματίζει καίριο ρόλο στη διασφάλιση της προσαρμοστικότητας και της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια ολοκληρωμένη εξέταση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, διερευνώντας καινοτόμες λύσεις και στρατηγικές για την καθοδήγηση των υπευθύνων χάραξης πολιτικής, των ερευνητών και των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας για την προώθηση της βιωσιμότητας στον τομέα. Η έρευνα υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης τεχνολογιών ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή, όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) και η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA), για την ενίσχυση της παραγωγικότητας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Boyd et al., 2022; Handisyde κ.ά., 2017· Froehlich κ.ά., 2018).

Η υδατοκαλλιέργεια είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς παραγωγής τροφίμων παγκοσμίως και διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη των διατροφικών απαιτήσεων ενός αυξανόμενου ανθρώπινου πληθυσμού. Ωστόσο, οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη έχουν δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις για τη βιωσιμότητά της. Οι αυξανόμενες παγκόσμιες θερμοκρασίες, η οξίνιση των ωκεανών, οι μεταβολές στην αλατότητα και ο πολλαπλασιασμός των παθογόνων αναδιαμορφώνουν τα υδάτινα οικοσυστήματα παρουσιάζοντας νέες προκλήσεις για τις επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας. Αυτές οι περιβαλλοντικές αλλαγές απειλούν όχι μόνο την οικονομική βιωσιμότητα του κλάδου της υδατοκαλλιέργειας, αλλά και την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια και βιοποικιλότητα.

Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει το θερμικό στρες στα υδάτινα περιβάλλοντα, επηρεάζοντας τους μεταβολικούς ρυθμούς, την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή των εκτρεφόμενων ειδών. Σύμφωνα με τους Boyd και McNevin (2015), οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εκτός του βέλτιστου εύρους για τα είδη υδατοκαλλιέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη ζήτηση οξυγόνου, μειωμένες ανοσολογικές αποκρίσεις και υψηλότερα ποσοστά θνησιμότητας. Επιπλέον, τα θερμαινόμενα νερά



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για επιβλαβείς ανθίσεις φυκιών (HABs), οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν τα επίπεδα οξυγόνου και να απελευθερώσουν τοξίνες επιβλαβείς για την υδρόβια ζωή (Diaz & Rosenberg, 2008). Τα φαινόμενα αυτά απαιτούν καινοτόμες προσεγγίσεις στον σχεδιασμό και τη διαχείριση του συστήματος υδατοκαλλιέργειας.

Η οξίνιση των ωκεανών, άμεση συνέπεια των αυξημένων ατμοσφαιρικών επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), θέτει μια άλλη κρίσιμη πρόκληση. Τα όξινα νερά μειώνουν τη διαθεσιμότητα ανθρακικών ιόντων που είναι απαραίτητα για τα οστρακοειδή και άλλους ασβεστοποιητικούς οργανισμούς για την κατασκευή των κελυφών και των σκελετών τους. Μελέτες των Cooley et al. (2009) υπογραμμίζουν τους οικονομικούς και οικολογικούς κινδύνους που συνδέονται με την οξίνιση, ιδιαίτερα για τις βιομηχανίες οστρακοειδών. Επιπλέον, οι μεταβολές στην αλατότητα που προκαλούνται από το λιώσιμο των πάγων και τα μεταβαλλόμενα πρότυπα βροχοπτώσεων διαταράσσουν τη γεωγραφική κατανομή των ειδών υδατοκαλλιέργειας, απαιτώντας την προσαρμογή των επιχειρήσεων σε αυτές τις δυναμικές συνθήκες (Troell et al., 2003).

Ο πολλαπλασιασμός των ασθενειών αποτελεί κλιμακούμενη ανησυχία στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής. Οι θερμότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν τους κύκλους ζωής πολλών παθογόνων και παρασίτων, αυξάνοντας τη συχνότητα και τη σοβαρότητα των εστιών. Για παράδειγμα, το *Vibrio* spp., ένα κοινό παθογόνο στην υδατοκαλλιέργεια, ευδοκιμεί σε υψηλές θερμοκρασίες, οδηγώντας σε σημαντικές οικονομικές απώλειες (Bondad-Reantaso et al., 2005). Οι προκλήσεις αυτές υπογραμμίζουν τη σημασία της υιοθέτησης ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή συστημάτων υδατοκαλλιέργειας που μπορούν να μετριάσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Η επιλογή συστήματος είναι ένα κρίσιμο βήμα για την προσαρμογή σε αυτές τις προκλήσεις. Τα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS), η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA) και τα υπεράκτια συστήματα υδατοκαλλιέργειας αντιπροσωπεύουν καινοτόμες προσεγγίσεις που μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα. Σύμφωνα με τους Martins et al. (2010), το RAS παρέχει ακριβή περιβαλλοντικό έλεγχο, μειώνοντας τους εξωτερικούς στρεσογόνους παράγοντες στα υδρόβια είδη. IMTA, ενσωματώνει είδη με συμπληρωματικούς οικολογικούς ρόλους, βελτιώνοντας τον κύκλο θρεπτικών ουσιών και την υγεία των οικοσυστημάτων. Η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, που λειτουργεί σε βαθύτερα ύδατα με σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παράκτια συστήματα που είναι ευάλωτα στον ευτροφισμό και την υποξία που προκαλούνται από το κλίμα (Holmer, 2010; Pereira κ.ά., 2024).

2. Επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει εισαγάγει σημαντικές προκλήσεις στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της θερμοκρασίας των υδάτων, της οξίνισης των ωκεανών και των μεταβαλλόμενων επιπέδων αλατότητας, που θέτουν σε κίνδυνο την υγεία και την παραγωγικότητα των υδρόβιων οργανισμών. Η αυξημένη θερμική καταπόνηση επιταχύνει τους



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

μεταβολικούς ρυθμούς, ενώ ο ευτροφισμός και η υποξία απειλούν τα υδρόβια ενδιαιτήματα. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή ενισχύει τον πολλαπλασιασμό ασθενειών και παθογόνων παραγόντων, ιδίως σε είδη με στενές περιβαλλοντικές ανοχές (Boyd & McNevin, 2015; Diaz & Rosenberg, 2008). Η κατανόηση αυτών των επιπτώσεων είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη προσαρμοστικών στρατηγικών που διασφαλίζουν την ανθεκτικότητα της υδατοκαλλιέργειας.

2.1 Θερμική καταπόνηση

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη αποτελεί πρόκληση για τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, ιδίως για είδη με στενές θερμικές ανοχές. Για παράδειγμα, μελέτες δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού οδηγεί σε υψηλότερους μεταβολικούς ρυθμούς στα ψάρια, αυξάνοντας τη ζήτηση οξυγόνου και το άγχος (Boyd and McNevin, 2015).

Οι αυξανόμενες παγκόσμιες θερμοκρασίες θέτουν σημαντικές προκλήσεις για τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας, ιδίως για είδη με στενές θερμικές ανοχές. Τα ψάρια, τα οστρακοειδή και άλλοι υδρόβιοι οργανισμοί έχουν συχνά ένα περιορισμένο εύρος βέλτιστων θερμοκρασιών που είναι απαραίτητες για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες. Οι αυξημένες θερμοκρασίες αυξάνουν τους μεταβολικούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα την αυξημένη ζήτηση οξυγόνου και το φυσιολογικό στρες (Boyd and McNevin, 2015). Με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, η διαθεσιμότητα οξυγόνου μειώνεται λόγω μειωμένης διαλυτότητας, δημιουργώντας συνθήκες υποξίας που προκαλείται από τη θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό επιδεινώνει τα ποσοστά θνησιμότητας σε είδη όπως ο σολομός και η τιλápια, ειδικά σε στρωματοποιημένα υδάτινα σώματα όπου τα επίπεδα οξυγόνου παρουσιάζουν ήδη διακυμάνσεις.

2.2 Ευτροφισμός και υποξία

Ο ευτροφισμός που προκαλείται από το κλίμα επιταχύνει τη φόρτωση θρεπτικών ουσιών στα υδάτινα οικοσυστήματα αυξάνοντας την απορροή θρεπτικών ουσιών από γεωργικές δραστηριότητες και εντείνοντας τις βροχοπτώσεις. Η περίσσεια θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα το άζωτο και ο φώσφορος, οδηγούν σε επιβλαβείς ανθίσεις φυκιών (HABs), οι οποίες απελευθερώνουν τοξίνες και καταστρέφουν το διαλυμένο οξυγόνο κατά την αποσύνθεσή τους. Ο ευτροφισμός είναι η κύρια αιτία των υποξικών ζωνών, που συχνά αναφέρονται ως «νεκρές ζώνες», οι οποίες καθιστούν τα υδρόβια ενδιαιτήματα ακατοίκητα. Για παράδειγμα, η υποξική ζώνη του Κόλπου του Μεξικού, που τροφοδοτείται από εισροές θρεπτικών ουσιών από τον ποταμό Μισισσιπή, έχει επεκταθεί λόγω τόσο ανθρωπογενών όσο και κλιματικών παραγόντων, επηρεάζοντας τα ιχθυαποθέματα και τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας.

2.3 Πολλαπλασιασμός ασθενειών

Τα θερμότερα νερά δημιουργούν συνθήκες ευνοϊκές για παθογόνους παράγοντες και παράσιτα, αυξάνοντας τους κινδύνους στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, το *Vibrio* spp. ευδοκیمی σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας οικονομικές απώλειες στη γαρίδα και την



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

ιχθυοκαλλιέργεια (Bondad-Reantaso et al., 2005; Pounds κ.ά., 2006). Επιπλέον, οι υψηλότερες θερμοκρασίες αποδυναμώνουν το ανοσοποιητικό σύστημα των υδρόβιων οργανισμών, καθιστώντας τους πιο επιρρεπείς σε λοιμώξεις. Οι προσβολές από θαλάσσιες ψείρες σε εκτροφεία σολομού, για παράδειγμα, έχουν επιδεινωθεί τα τελευταία χρόνια, οδηγώντας σε σημαντικές οικονομικές απώλειες και αυξημένη εξάρτηση από χημικές επεξεργασίες, οι οποίες ενέχουν περιβαλλοντικούς κινδύνους (Abolofia et al., 2017).

2.4 Οξίνιση των ωκεανών

Η οξίνιση των ωκεανών είναι ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα που επηρεάζει την υδατοκαλλιέργεια, ιδίως την οστρακοκαλλιέργεια. Καθώς το ατμοσφαιρικό CO₂ διαλύεται στους ωκεανούς, σχηματίζει ανθρακικό οξύ, το οποίο μειώνει τα επίπεδα pH και μειώνει τη διαθεσιμότητα ανθρακικών ιόντων που είναι απαραίτητα για το σχηματισμό κελύφους και σκελετού σε ασβεστοποιητικούς οργανισμούς (Cooley et al., 2009). Τα μαλάκια όπως τα στρείδια και τα μύδια είναι ιδιαίτερα ευάλωτα, με τα όξινα νερά να οδηγούν σε λεπτότερα κελύφη και χαμηλότερα ποσοστά επιβίωσης. Επιπλέον, η οξίνιση διαταράσσει τις αισθητηριακές λειτουργίες σε ορισμένα είδη ψαριών, μεταβάλλοντας τις συμπεριφορές αποφυγής των θηρευτών και τη δυναμική του οικοσυστήματος (Munday et al., 2009).

2.5 Μεταβολές στην αλατότητα

Το λιώσιμο των πάγων και η αλλαγή των βροχοπτώσεων μεταβάλλουν τα επίπεδα αλατότητας σε θαλάσσια περιβάλλοντα και περιβάλλοντα εκβολών ποταμών, επηρεάζοντας την κατανομή και την παραγωγικότητα των ειδών υδατοκαλλιέργειας. Είδη όπως οι γαρίδες και το λαβράκι, τα οποία είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της αλατότητας, μπορεί να παρουσιάσουν μειωμένη ανάπτυξη και αναπαραγωγή (Troell et al., 2003). Στο Μπαγκλαντές, τα αυξανόμενα επίπεδα αλατότητας στα παράκτια ύδατα ανάγκασαν τις μονάδες εκτροφής γαρίδας να προσαρμοστούν εισάγοντας είδη ανθεκτικά στο αλάτι, αλλά αυτές οι αλλαγές έρχονται με σημαντικό οικονομικό και οικολογικό κόστος.

3. Βασικά κριτήρια για την επιλογή συστήματος

Η επιλογή συστημάτων υδατοκαλλιέργειας που μπορούν να αντέξουν τις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα και την οικονομική βιωσιμότητα. Τα βασικά κριτήρια περιλαμβάνουν την ανθεκτικότητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, τον μετριασμό του ευτροφισμού, τον έλεγχο των παθογόνων παραγόντων, την ενεργειακή απόδοση και την προσαρμοστικότητα στις αλλαγές της αλατότητας. Συστήματα όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) και η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA) αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά αυτές τις προκλήσεις προσφέροντας περιβαλλοντικό έλεγχο και κύκλο θρεπτικών ουσιών, αντίστοιχα (Martins et al., 2010; Pereira κ.ά., 2024). Τα κριτήρια αυτά εξασφαλίζουν την προσαρμοστικότητα των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας στις εξελισσόμενες κλιματικές συνθήκες.



3.1 Ανθεκτικότητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας

Τα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) προσφέρουν ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας, ενισχύοντας την προσαρμοστικότητα του συστήματος στη θερμική καταπόνηση. Τα συστήματα πρέπει να προσαρμόζονται στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ώστε να μειώνεται η θερμική καταπόνηση των υδρόβιων οργανισμών. Τα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά, προσφέροντας ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού και άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων. Το RAS παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών για την ανάπτυξη και την επιβίωση των ειδών (Martins et al., 2010) ένα παράδειγμα είναι η υδατοκαλλιέργεια σολομού στη Νορβηγία που χρησιμοποιεί την τεχνολογία RAS για να μετριάσει τις επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας της θάλασσας (Badiola et al., 2012).

3.2 Μετριασμός του ευτροφισμού

Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA) ενσωματώνει τροφοδότες φίλτρων και φύκια για τη μείωση του φορτίου θρεπτικών ουσιών, την απορρόφηση περίσσειας θρεπτικών ουσιών, τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας του νερού και τον μετριασμό του ευτροφισμού (Pereira et al., 2024). Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA) είναι μια βιώσιμη λύση για τη διαχείριση θρεπτικών ουσιών. Το IMTA ενσωματώνει είδη όπως τα ψάρια, τα φύκια και τα οστρακοειδή για την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και τη μείωση των κινδύνων ευτροφισμού. Οι φάρμες φυκιών στην Ασία έχουν επιδείξει αποτελεσματικό κύκλο θρεπτικών ουσιών, μειώνοντας τα HABs και βελτιώνοντας την ποιότητα του νερού (Troell et al., 2003).

3.3 Έλεγχος παθογόνων

Η κλιματική αλλαγή έχει επιδεινώσει τους κινδύνους παθογόνων και ασθενειών στην υδατοκαλλιέργεια, καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες των υδάτων επιταχύνουν τους κύκλους ζωής επιβλαβών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των βακτηρίων, των ιών και των παρασίτων. Οι προηγμένες στρατηγικές ελέγχου παθογόνων είναι απαραίτητες για την προστασία των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας από αυτούς τους κινδύνους. Τα βιοασφαλή συστήματα, όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS), διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο απομονώνοντας τα εκτρεφόμενα είδη από εξωτερικά περιβάλλοντα, μειώνοντας σημαντικά την έκθεση σε παθογόνους παράγοντες. Τεχνολογίες όπως η αποστείρωση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV), η επεξεργασία με όζον και τα βιοφίλτρα ελαχιστοποιούν αποτελεσματικά τα μικροβιακά φορτία στα συστήματα νερού, προστατεύοντας τα υδρόβια είδη (Bondad-Reantaso et al., 2005). Για παράδειγμα, οι φάρμες γαρίδας στη Νοτιοανατολική Ασία έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία RAS σε συνδυασμό με αποστείρωση UV για την καταπολέμηση των εστιών *Vibrio*, οι οποίες συχνά προκαλούνται από την αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας (Aly and Fathi, 2024). Οι ανθεκτικές στα παθογόνα πρακτικές υδατοκαλλιέργειας, όπως η επιλεκτική αναπαραγωγή για ανοχή στις ασθένειες, ενισχύουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα των ευάλωτων ειδών.



3.4 Ενεργειακή απόδοση και μείωση του αποτυπώματος άνθρακα

Τα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας. Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, και η υιοθέτηση αποδοτικών τεχνολογιών, όπως τα προηγμένα συστήματα αερισμού, είναι ζωτικής σημασίας για τη βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα. Τα ανακυκλούμενα συστήματα υδατοκαλλιέργειας (RAS), ενώ είναι ενεργοβόρα λόγω της άντλησης νερού, του αερισμού και της ρύθμισης της θερμοκρασίας, παρουσιάζουν μια βιώσιμη πορεία προς τη βιωσιμότητα όταν τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα, οι υβριδικές ηλιακές ρυθμίσεις RAS έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν το λειτουργικό ενεργειακό κόστος κατά 30%, διατηρώντας παράλληλα την παραγωγικότητα (Manolache & Andrei, 2024).

Καινοτόμες ενεργειακές λύσεις, όπως τα συστήματα μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια που μετατρέπουν τα οργανικά απόβλητα υδατοκαλλιέργειας σε βιοαέριο, ενισχύουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις διαχείρισης αποβλήτων (Martins et al., 2010). Τα ηλιακά συστήματα υδατοκαλλιέργειας σε περιοχές με περιορισμένους πόρους, όπως η υποσαχάρια Αφρική, καταδεικνύουν πώς οι ενεργειακά αποδοτικές λύσεις μπορούν να προωθήσουν την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα. Αξιοποιώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις αποδοτικές τεχνολογίες αερισμού, ο κλάδος της υδατοκαλλιέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά τον περιβαλλοντικό του αντίκτυπο, προωθώντας παράλληλα τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα και παραγωγικότητα (Badiola et al., 2012).

3.5 Προσαρμοστικότητα στις διακυμάνσεις της αλατότητας

Τα συστήματα που βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές και περιοχές εκβολών ποταμών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις αλλαγές αλατότητας που προκαλούνται από την υπερθέρμανση του πλανήτη. Τα είδη ευρυαλίνης, ικανά να ανέχονται ένα ευρύ φάσμα αλατότητας, μπορούν να έχουν προτεραιότητα. Τα προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάπτυξη ειδών με αυξημένη ανοχή στην αλατότητα (Rahman et al., 2021). Ένα παράδειγμα είναι οι επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας στο Μπαγκλαντές, προσαρμοσμένες στις εισβολές αλατότητας με την καλλιέργεια ειδών ανθεκτικών στο αλάτι, όπως η τιλάπια.

Η προσαρμοστικότητα στις διακυμάνσεις της αλατότητας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, ιδίως στις παράκτιες περιοχές και στις εκβολές ποταμών, όπου η κλιματική αλλαγή επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα πρότυπα αλατότητας. Το λιώσιμο των πολικών πάγων, τα μεταβαλλόμενα μοτίβα βροχοπτώσεων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας συμβάλλουν σε απρόβλεπτες διακυμάνσεις της αλατότητας, επηρεάζοντας τα είδη που είναι ευαίσθητα σε αυτές τις αλλαγές. Τα συστήματα πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στην επιλογή ειδών και στις τεχνολογικές λύσεις για τη διατήρηση της παραγωγικότητας υπό τέτοιες συνθήκες. Τα είδη ευρυαλίνης, τα οποία ανέχονται ένα ευρύ φάσμα επιπέδων αλατότητας, ευνοούνται συνήθως σε αυτά τα περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, η τιλάπια και το λαβράκι παρουσιάζουν ισχυρή ανθεκτικότητα στις διακυμάνσεις της αλατότητας, καθιστώντας τους ιδανικούς υποψηφίους για υδατοκαλλιέργεια σε μεταβλητά περιβάλλοντα (Tine et al., 2014; Rahman κ.ά., 2021).



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Οι τεχνολογικές παρεμβάσεις, όπως τα προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής, έχουν προωθήσει την ανάπτυξη στελεχών με ενισχυμένη ανοχή στην αλατότητα. Η έρευνα για την τιλάπια έχει δείξει τη δυνατότητα αναπαραγωγής παραλλαγών ανθεκτικών στο αλάτι ικανών να ευδοκιμήσουν σε περιβάλλοντα που επηρεάζονται από την εισβολή αλατότητας (Yue et al., 2024). Επιπλέον, κλειστά συστήματα όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) προσφέρουν ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπου τα επίπεδα αλατότητας μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ανταποκρίνονται στις ειδικές απαιτήσεις του είδους, μειώνοντας το άγχος και ενισχύοντας τους ρυθμούς ανάπτυξης. Οι καινοτομίες στις τεχνολογίες φιλτραρίσματος και αφαλάτωσης νερού επιτρέπουν επίσης στους χειριστές να μετριάσουν αποτελεσματικά τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της αλατότητας (Martins et al., 2010).

Παραδείγματα προσαρμοστικών πρακτικών υδατοκαλλιέργειας περιλαμβάνουν επιχειρήσεις στο Μπαγκλαντές που έχουν μετατοπιστεί σε είδη ανθεκτικά στο αλάτι ως απάντηση στην αυξανόμενη παράκτια αλατότητα. Αυτές οι πρακτικές έχουν ελαχιστοποιήσει τις οικονομικές απώλειες και έχουν ενισχύσει την επισιτιστική ασφάλεια σε ευάλωτες περιοχές (Troell et al., 2023). Δίνοντας προτεραιότητα στην προσαρμοστικότητα, τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας μπορούν να αντέξουν καλύτερα τις δυναμικές προκλήσεις που θέτει η υπερθέρμανση του πλανήτη, διασφαλίζοντας βιώσιμη παραγωγή και ανθεκτικότητα.

3.6 Οικονομική βιωσιμότητα και επεκτασιμότητα

Η οικονομική βιωσιμότητα και η επεκτασιμότητα των προηγμένων συστημάτων υδατοκαλλιέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ευρείας υιοθέτησής τους. Ενώ συστήματα όπως το RAS και το IMTA προσφέρουν μακροπρόθεσμα οφέλη, το υψηλό αρχικό κόστος τους μπορεί να αποτρέψει τους φορείς εκμετάλλευσης μικρής και μεσαίας κλίμακας. Οι μηχανισμοί επιμερισμού του κόστους, όπως οι συμπράξεις δημόσιου-ιδιωτικού τομέα και οι κρατικές επιδοτήσεις, μπορούν να αντιμετωπίσουν τα οικονομικά εμπόδια. Επιπλέον, οι οικονομίες κλίμακας που επιτυγχάνονται μέσω μεγαλύτερων λειτουργιών ή συνεργατικών μοντέλων μπορούν να μειώσουν το κόστος ανά μονάδα. Μελέτες δείχνουν ότι η κλιμάκωση των συστημάτων IMTA στον Καναδά αύξησε την αποδοτικότητα της παραγωγής κατά 25% ενώ βελτίωσε σημαντικά τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα (Baltadakis, 2021). Οι καινοτομίες στα αρθρωτά συστήματα υδατοκαλλιέργειας, οι οποίες επιτρέπουν τη σταδιακή επέκταση, παρέχουν ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις για τους νεοεισερχόμενους στον κλάδο.

4. Καινοτόμα συστήματα για την αντιμετώπιση των κλιματικών προκλήσεων

Καινοτόμα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, όπως η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, η RAS και η IMTA, παρουσιάζουν βιώσιμες λύσεις για την καταπολέμηση των προκλήσεων που προκαλούνται από το κλίμα. Η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια μειώνει τους κινδύνους από τον ευτροφισμό και την υποξία λειτουργώντας σε σταθερά περιβάλλοντα βαθέων υδάτων, ενώ το RAS παρέχει ακριβή



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

περιβαλλοντικό έλεγχο, ελαχιστοποιώντας τις εξωτερικές επιπτώσεις. Το IMTA ενισχύει την οικολογική ανθεκτικότητα ενσωματώνοντας συμπληρωματικά είδη, βελτιώνοντας την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και την ποιότητα του νερού (Holmer, 2010; Pereira κ.ά., 2024). Οι τεχνολογίες αυτές καταδεικνύουν τις δυνατότητες για βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας που ευθυγραμμίζονται με περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους.

4.1 Υδατοκαλλιέργεια ανοικτής θάλασσας

Η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκαλούνται από το κλίμα στα παράκτια και παράκτια συστήματα. Λειτουργώντας σε βαθύτερα νερά, τα συστήματα αυτά επωφελούνται από σταθερά προφίλ θερμοκρασίας, υψηλότερα επίπεδα οξυγόνου και μειωμένη συσσώρευση θρεπτικών ουσιών, μετριάζοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με τον ευτροφισμό και την υποξία (Holmer, 2010). Οι υπεράκτιοι κλωβοί, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για την τσιπούρα (*Sparus aurata*) και το λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) στη Μεσόγειο, καταδεικνύουν τη δυνατότητα αυτών των συστημάτων να επεκτείνουν την παραγωγή υδατοκαλλιέργειας ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Nielsen et al., 2021). Ωστόσο, τα υπεράκτια συστήματα απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε ισχυρές υποδομές για να αντέξουν σε ισχυρά ρεύματα και κυματική δράση, καθώς και προηγμένες τεχνολογίες παρακολούθησης για τη διασφάλιση της λειτουργικής αποδοτικότητας.

4.2 Συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS)

Το RAS ελαχιστοποιεί τη χρήση νερού και επιτρέπει τον ακριβή περιβαλλοντικό έλεγχο, μειώνοντας τις επιπτώσεις από τις εξωτερικές κλιματικές διακυμάνσεις (Martins et al., 2010). Τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) αντιπροσωπεύουν μια προσέγγιση αιχμής για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών περιορισμών και των περιορισμών των πόρων. Αυτά τα κλειστά συστήματα ανακυκλώνουν το νερό μέσα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, μειώνοντας σημαντικά τη χρήση νερού και περιορίζοντας τις επιπτώσεις των εξωτερικών περιβαλλοντικών διακυμάνσεων (Badiola et al., 2012). Το RAS επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας, των επιπέδων οξυγόνου και της διαχείρισης αποβλήτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για είδη ευαίσθητα στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Για παράδειγμα, η εκτροφή σολομού στη Νορβηγία βασίζεται όλο και περισσότερο στο RAS για τον μετριασμό των επιπτώσεων της αύξησης της θερμοκρασίας των παράκτιων υδάτων. Ωστόσο, οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και το λειτουργικό κόστος των RAS απαιτούν συνεχή καινοτομία για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και της οικονομικής βιωσιμότητας (Martins et al., 2010).

4.3 Ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA)

Το IMTA ενισχύει την οικολογική ανθεκτικότητα ενσωματώνοντας είδη με συμπληρωματικές λειτουργίες, όπως ψάρια, οστρακοειδή και φύκια (Pereira et al., 2024). Η Ολοκληρωμένη



Funded by
the European Union



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Πολυτροφική Υδατοκαλλιέργεια (IMTA) είναι ένα καινοτόμο σύστημα που ενσωματώνει πολλαπλά είδη από διαφορετικά τροφικά επίπεδα σε μία μόνο γεωργική δραστηριότητα. Αυτό το σύστημα αξιοποιεί τις φυσικές οικολογικές σχέσεις μεταξύ των ειδών για τη βελτίωση του κύκλου των θρεπτικών ουσιών και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, τα φύκια και τα δίθυρα μπορούν να απορροφήσουν την περίσσεια θρεπτικών ουσιών που παράγονται από την παραγωγή ψαριών, μετριάζοντας τον ευτροφισμό και βελτιώνοντας την ποιότητα του νερού (Pereira et al., 2024). Στον Καναδά, τα συστήματα IMTA που ενσωματώνουν σολομό Ατλαντικού (*Salmo salar*), μύδια (*Mytilus edulis*) και φύκια (*Saccharina latissima*) έχουν επιδείξει οικολογικά και οικονομικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης παραγωγής βιομάζας και των μειωμένων φορτίων θρεπτικών ουσιών στα γύρω ύδατα (Troell et al., 2003).

4.4 Υδατοκαλλιέργεια φυκιών

Η καλλιέργεια φυκιών αναγνωρίζεται ως ένα ανθεκτικό στην κλιματική αλλαγή σύστημα υδατοκαλλιέργειας με σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Τα φύκια απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα και θρεπτικά συστατικά από το νερό, αντισταθμίζοντας την οξίνιση των ωκεανών και τον ευτροφισμό. Επιπλέον, η καλλιέργεια φυκιών έχει προταθεί ως στρατηγική δέσμευσης άνθρακα για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Froehlich et al., 2019). Στην Ασία, οι μεγάλης κλίμακας φάρμες φυκιών συμβάλλουν σημαντικά στις τοπικές οικονομίες, βελτιώνοντας παράλληλα την υγεία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως οι υπεράκτιες πλατφόρμες καλλιέργειας φυκιών, επεκτείνουν περαιτέρω τις δυνατότητες βιώσιμης παραγωγής φυκιών σε περιοχές με περιορισμένο παράκτιο χώρο (Visch et al., 2023).

4.5 Έξυπνες τεχνολογίες υδατοκαλλιέργειας

Η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI), το Internet of Things (IoT) και η τηλεπισκόπηση, έχει φέρει επανάσταση στις επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας. Τα έξυπνα συστήματα επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και το διαλυμένο οξυγόνο, επιτρέποντας στους αγρότες να ανταποκρίνονται προληπτικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες (Føre et al., 2018). Για παράδειγμα, τα αυτοματοποιημένα συστήματα σίτισης και τα διαγνωστικά υγείας που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη ενισχύουν τη λειτουργική αποδοτικότητα, μειώνοντας παράλληλα τα απόβλητα. Οι καινοτομίες αυτές στηρίζουν τη βιωσιμότητα και την επεκτασιμότητα των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας υπό τις πιέσεις της κλιματικής αλλαγής.

5. Πολιτικές και οικονομικές εκτιμήσεις

Η υιοθέτηση ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή συστημάτων υδατοκαλλιέργειας απαιτεί ολοκληρωμένη στήριξη πολιτικής και οικονομικά πλαίσια. Τα ρυθμιστικά κίνητρα, όπως οι επιδοτήσεις και οι επιχορηγήσεις, μπορούν να αντισταθμίσουν το υψηλό αρχικό κόστος, ενώ οι διεθνείς συνεργασίες και η ζήτηση για βιώσιμα προϊόντα που καθοδηγούνται από την αγορά οδηγούν



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

στον μετασχηματισμό της βιομηχανίας. Τα συστήματα πιστοποίησης και τα οικολογικά σήματα παρέχουν οικονομικά κίνητρα για περιβαλλοντικά υπεύθυνες πρακτικές. Επιπλέον, μηχανισμοί ασφάλισης προσαρμοσμένοι στους κλιματικούς κινδύνους διασφαλίζουν την επιχειρησιακή συνέχεια για τα ευάλωτα ενδιαφερόμενα μέρη (FAO, 2020· Μπους κ.ά., 2013). Αυτές οι εκτιμήσεις είναι απαραίτητες για την ευθυγράμμιση των πρακτικών υδατοκαλλιέργειας με τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας.

5.1 Κανονιστική υποστήριξη

Οι κυβερνήσεις διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην προώθηση συστημάτων υδατοκαλλιέργειας ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή. Οι πολιτικές θα πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στα κίνητρα για την υιοθέτηση βιώσιμων τεχνολογιών, όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) και η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA). Για παράδειγμα, η Κοινή Αλιευτική Πολιτική (ΚΑΛΠ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης προωθεί τη βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια ενσωματώνοντας στρατηγικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή (FAO, 2020). Οι επιδοτήσεις, οι φορολογικές ελαφρύνσεις και οι επιχορηγήσεις μπορούν να ενθαρρύνουν περαιτέρω τις επενδύσεις σε καινοτόμα συστήματα. Επιπλέον, τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει να αντιμετωπίζουν ζητήματα όπως η αποδοτικότητα της χρήσης νερού, η διαχείριση αποβλήτων και ο έλεγχος ασθενειών για την ευθυγράμμιση των πρακτικών υδατοκαλλιέργειας με τους στόχους περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (ΟΟΣΑ, 2021).

5.2 Οικονομική σκοπιμότητα

Το υψηλό αρχικό κόστος των προηγμένων συστημάτων, όπως το RAS και το IMTA, πρέπει να αντισταθμιστεί από μακροπρόθεσμα οφέλη, συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων απωλειών από τις επιπτώσεις που σχετίζονται με το κλίμα (Tett et al., 2011). Η μετάβαση σε προηγμένα συστήματα υδατοκαλλιέργειας συνεπάγεται συχνά υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο μπορεί να αποτρέψει την ευρεία υιοθέτησή τους, ιδίως σε περιοχές χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος. Η ανάλυση κόστους-οφέλους είναι απαραίτητη για να καταδειχθούν τα μακροπρόθεσμα οικονομικά πλεονεκτήματα των ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων απωλειών από περιβαλλοντικές διαταραχές και διαταραχές που σχετίζονται με ασθένειες. Για παράδειγμα, το RAS μειώνει την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές νερού και ελαχιστοποιεί τους περιβαλλοντικούς κινδύνους, οδηγώντας σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος με την πάροδο του χρόνου (Badiola et al., 2012). Οι συμπράξεις δημόσιου-ιδιωτικού τομέα και τα προγράμματα χρηματοδοτικής βοήθειας μπορούν να γεφυρώσουν τα χρηματοδοτικά κενά, εξασφαλίζοντας ευρύτερη προσβασιμότητα σε αυτές τις τεχνολογίες (Παγκόσμια Τράπεζα, 2013).

5.3 Διεθνής συνεργασία

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής υπερβαίνουν τα εθνικά σύνορα, καθιστώντας αναγκαία τη διεθνή συνεργασία. Οι συνεργατικές ερευνητικές πρωτοβουλίες, όπως αυτές που υπάγονται στο



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

πλαίσιο του προγράμματος «Ορίζων Ευρώπη», επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τεχνολογιών υδατοκαλλιέργειας ανθεκτικών στην κλιματική αλλαγή και στην ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Εξωτερικής Δράσης (2021). Επιπλέον, διεθνείς οργανισμοί όπως ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) παρέχουν τεχνική υποστήριξη και συστάσεις πολιτικής για την ενίσχυση της παγκόσμιας ανθεκτικότητας της υδατοκαλλιέργειας (FAO, 2024). Περιφερειακές συμμαχίες, όπως η Επιτροπή Αλιείας Ασίας-Ειρηνικού (APFIC), διευκολύνουν επίσης τη μεταφορά γνώσεων και τη συγκέντρωση πόρων, επιτρέποντας στις χώρες να υιοθετήσουν προσαρμοσμένες λύσεις για τις μοναδικές προκλήσεις τους (APFIC, 2019). Οι παγκόσμιες συμπράξεις μπορούν να διευκολύνουν την ανταλλαγή γνώσεων και τη χρηματοδότηση της έρευνας σχετικά με πρακτικές υδατοκαλλιέργειας ανθεκτικές στην κλιματική αλλαγή (Tett κ.ά., 2011).

5.4 Δυναμική της αγοράς και ευαισθητοποίηση των καταναλωτών

Οι δυνάμεις της αγοράς είναι καθοριστικής σημασίας για την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών υδατοκαλλιέργειας. Η αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για φιλικά προς το περιβάλλον θαλασσινά έχει δημιουργήσει οικονομικά κίνητρα για τους παραγωγούς να εφαρμόσουν βιώσιμα συστήματα. Τα συστήματα πιστοποίησης, όπως αυτά που προσφέρονται από το Συμβούλιο Διαχείρισης Υδατοκαλλιέργειας (ASC), παρέχουν πλεονεκτήματα στην αγορά ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα και προσφέροντας διαφάνεια στους καταναλωτές, προωθώντας τη στροφή προς τη βιωσιμότητα σε ολόκληρο τον κλάδο (Bush et al., 2013). Αυτές οι πιστοποιήσεις, σε συνδυασμό με εκπαιδευτικές εκστρατείες που τονίζουν τα περιβαλλοντικά οφέλη των πρακτικών προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, όπως τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) και η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA), επηρεάζουν σημαντικά την αγοραστική συμπεριφορά, ενθαρρύνοντας τη στροφή της αγοράς προς φιλικά προς το περιβάλλον θαλασσινά (Potts et al., 2021). Επιπλέον, οι ψηφιακές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της αλυσίδας blockchain, μετασχηματίζουν την αλυσίδα εφοδιασμού θαλασσινών επιτρέποντας την ιχνηλασιμότητα, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη και διασφαλίζοντας τη λογοδοσία μεταξύ καταναλωτών και παραγωγών (Probst, 2020). Με την ενσωμάτωση συστημάτων πιστοποίησης, εκπαιδευτικών προσπαθειών και τεχνολογικών εξελίξεων, ο κλάδος της υδατοκαλλιέργειας ευθυγραμμίζεται σταδιακά με τους στόχους βιωσιμότητας, εξασφαλίζοντας τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη.

5.5 Μηχανισμοί μετριασμού κινδύνου και ασφάλισης

Δεδομένου ότι οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το κλίμα, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα και οι επιδημικές εξάρσεις, αυξάνονται σε συχνότητα και ένταση, οι ισχυρές στρατηγικές μετριασμού των κινδύνων και οι προσαρμοσμένοι μηχανισμοί ασφάλισης είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας. Τα ασφαλιστικά προϊόντα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την υδατοκαλλιέργεια, όπως η ασφάλιση καλλιεργειών για είδη υδατοκαλλιέργειας ή η παραμετρική ασφάλιση για ζημιές που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες, μπορούν να προσφέρουν οικονομική



Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

ασφάλεια στους φορείς εκμετάλλευσης. Η συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων και ασφαλιστικών παρόχων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη οικονομικά προσιτών και προσβάσιμων ασφαλιστικών συστημάτων. Για παράδειγμα, τα προγράμματα παραμετρικής ασφάλισης στις Φιλιππίνες παρείχαν με επιτυχία πληρωμές σε ιχθυοκαλλιεργητές που επλήγησαν από τυφώνες, επιτρέποντας γρήγορη ανάκαμψη και συνέχεια των δραστηριοτήτων (Van Anrooy et al., 2022). Τα εργαλεία εκτίμησης κινδύνου, όπως η μοντελοποίηση του κλίματος και τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, ενισχύουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα, βοηθώντας τους φορείς εκμετάλλευσης να προβλέπουν και να μετριάζουν πιθανές διαταραχές (Allison et al., 2009).

6. Συμπέρασμα

Οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην υδατοκαλλιέργεια υπογραμμίζουν την ανάγκη για στρατηγική επιλογή συστημάτων και βιώσιμες πρακτικές για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης ανθεκτικότητας και παραγωγικότητας του κλάδου. Καθώς οι προκλήσεις που προκαλούνται από το κλίμα, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η οξίνιση των ωκεανών και ο πολλαπλασιασμός των ασθενειών, συνεχίζουν να εντείνονται, η υιοθέτηση καινοτόμων και προσαρμοστικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας καθίσταται επιτακτική. Το κεφάλαιο αυτό έχει επισημάνει κρίσιμες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS), της ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (IMTA) και της υπεράκτιας υδατοκαλλιέργειας, ως βιώσιμες λύσεις για τον μετριασμό αυτών των προκλήσεων.

Τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση (RAS) παρέχουν ακριβή περιβαλλοντικό έλεγχο, επιτρέποντας στις λειτουργίες να αντέχουν στις εξωτερικές κλιματικές διακυμάνσεις, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές νερού. Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (IMTA) προωθεί την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και τη σταθερότητα του οικοσυστήματος, προσφέροντας μια ολιστική προσέγγιση στη βιωσιμότητα. Η υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, που λειτουργεί σε βαθύτερα και σταθερότερα ύδατα, ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις του παράκτιου ευτροφισμού και υποξίας, παρέχοντας μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για την επέκταση της παραγωγής.

Η μετάβαση σε αυτά τα συστήματα απαιτεί ολοκληρωμένα πλαίσια πολιτικής και οικονομικά κίνητρα για την υπέρβαση των εμποδίων που συνδέονται με το υψηλό αρχικό κόστος. Οι κυβερνήσεις, οι ιδιωτικοί φορείς και οι διεθνείς οργανισμοί πρέπει να συνεργάζονται μέσω μηχανισμών όπως διεθνείς συμφωνίες, προγράμματα χρηματοδότησης και πλατφόρμες ανταλλαγής γνώσεων. Ειδικά μέτρα, συμπεριλαμβανομένων επιδοτήσεων, φορολογικών ελαφρύνσεων και επιχορηγήσεων, θα είναι ουσιαστικής σημασίας για την ενθάρρυνση των επενδύσεων σε τεχνολογίες ανθεκτικές στην κλιματική αλλαγή, ιδίως για τους γεωργούς μικρής κλίμακας που είναι πιο ευάλωτοι σε κλιματικούς κλυδωνισμούς.

Η ευαισθητοποίηση των καταναλωτών και η ζήτηση της αγοράς για περιβαλλοντικά βιώσιμα θαλασσινά προϊόντα δημιουργούν πρόσθετες ευκαιρίες για τον μετασχηματισμό της βιομηχανίας. Τα συστήματα πιστοποίησης και τα οικολογικά σήματα μπορούν να δώσουν κίνητρα στους παραγωγούς να υιοθετήσουν πρακτικές ανθεκτικές στην κλιματική αλλαγή, ενισχύοντας παράλληλα την

Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

εμπιστοσύνη και τη διαφάνεια μεταξύ των καταναλωτών. Οι εκπαιδευτικές εκστρατείες και η παγκόσμια κλιμάκωση αυτών των πρωτοβουλιών μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω τον αντίκτυπό τους, ιδίως σε περιοχές με υψηλό δυναμικό υδατοκαλλιέργειας. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως η τεχνολογία blockchain για την ιχνηλασιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού θα διαδραματίσει επίσης ζωτικό ρόλο στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών.

Όσον αφορά το μέλλον, οι επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη είναι ζωτικής σημασίας για την καινοτομία και τη βελτίωση των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας. Οι τομείς προτεραιότητας περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στο RAS, την ανάπτυξη συστημάτων IMTA χαμηλού κόστους και την προώθηση στρατηγικών ελέγχου παθογόνων. Η μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική παρακολούθηση και οι προορατικές στρατηγικές διαχείρισης θα διασφαλίσουν την προσαρμοστικότητα στην εξελισσόμενη κλιματική πραγματικότητα.

Με την ενσωμάτωση των τεχνολογικών εξελίξεων και των οικολογικών αρχών, ο τομέας της υδατοκαλλιέργειας μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής, οι ερευνητές και οι ενδιαφερόμενοι φορείς της βιομηχανίας πρέπει να δράσουν αποφασιστικά για την εφαρμογή συστημάτων που διασφαλίζουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του τομέα εν μέσω ενός μεταβαλλόμενου κλίματος. Μέσω μιας συλλογικής προσπάθειας, η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να συνεχίσει να ευδοκιμεί, συμβάλλοντας στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια και την οικονομική ανάπτυξη σε μια εποχή κλιματικής αλλαγής.

7. Βιβλιογραφία

- Abolofia, J., Asche, F., & Wilen, J. E. (2017). The cost of lice: quantifying the impacts of parasitic sea lice on farmed salmon. *Marine Resource Economics*, 32(3), 329-349.
- Allison, E. H., Perry, A. L., Badjeck, M. C., Neil Adger, W., Brown, K., Conway, D., ... & Dulvy, N. K. (2009). Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and fisheries*, 10(2), 173-196.
- Aly, S. M., & Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: a scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763-8789.
- Asia-Pacific Fishery Commission. (2014). Regional Overview of Aquaculture Trends in the Asia-Pacific Region. Food and Agriculture Organization of the United Nations regional office for Asia and the Pacific, Bangkok,ailand.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Baltadakis, A. (2021). Investigating Integrated Multi-Trophic Aquaculture at different spatial sales.
- Bank, W. (2013). Fish to 2030 Prospects for Fisheries and Aquaculture World Bank Report Number 83177-GLB. Washington, DC.

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

- Bondad-Reantaso, M. G., et al. (2005). Disease and health management in Asian aquaculture. *Veterinary Parasitology*, 132(3-4), 249-272.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). Aquaculture, resource use, and the environment. *John Wiley & Sons*.
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., ... & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578-633.
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... & Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture?. *Science*, 341(6150), 1067-1068.
- Cooley, S. R., et al. (2009). Ocean acidification's potential to alter global seafood supply. *Oceanography*, 22(4), 172-181.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- European External Action Service (2021). Horizon Europe strategic plan 2021–2024. European Union. https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon_europe_strategic_plan_2021-2024.pdf
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., ... & Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *biosystems engineering*, 173, 176-193.
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R., & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature ecology & evolution*, 2(11), 1745-1750.
- Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M., & Halpern, B. S. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29(18), 3087-3093.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture. Final Technical Report, DFID, Stirling. 151pp.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: Perspectives, concerns, and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- Manolache, A. I., & Andrei, G. (2024). A Comprehensive Review of Multi-Use Platforms for Renewable Energy and Aquaculture Integration. *Energies*, 17(19), 4816.
- Martins, C. I., et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93.

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

- Munday, P. L., Dixon, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Døving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1848-1852.
- Nielsen, R., Ankamah-Yeboah, I., & Llorente, I. (2021). Technical efficiency and environmental impact of seabream and seabass farms. *Aquaculture Economics & Management*, 25(1), 106-125.
- OECD (2021), *Strengthening Climate Resilience: Guidance for Governments and Development Co-operation*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4b08b7be-en>.
- Pereira, R., Yarish, C., & Critchley, A. T. (2024). Seaweed aquaculture for human foods in land based and IMTA systems. In *Applications of Seaweeds in Food and Nutrition* (pp. 77-99). Elsevier.
- Potts, J., Wilkings, A., Lynch, M., & McFatridge, S. (2021). State of Sustainability Initiatives Review: Standards and the Blue Economy. International Institute for Sustainable Development.
- Pounds, J. A., et al. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167.
- Probst, W. N. (2020). How emerging data technologies can increase trust and transparency in fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1286-1294.
- Rahman, M. L., Shahjahan, M., & Ahmed, N. (2021). Tilapia farming in Bangladesh: Adaptation to climate change. *Sustainability*, 13(14), 7657.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and aquaculture technical paper*, (589), I.
- Tett, P., et al. (2011). Defining and detecting undesirable disturbance in the context of marine eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 1147-1155.
- Tine, M., Kuhl, H., Gagnaire, P. A., Louro, B., Desmarais, E., Martins, R. S., ... & Reinhardt, R. (2014). European sea bass genome and its variation provide insights into adaptation to euryhalinity and speciation. *Nature communications*, 5(1), 5770.
- Troell, M., et al. (2003). Integrated mariculture: Asking the right questions. *Aquaculture*, 226(1-4), 69-90.
- Yue, G. H., Ma, K. Y., & Xia, J. H. (2024). Status of conventional and molecular breeding of salinity-tolerant tilapia. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 271-286.
- Van Anrooy, R., Espinoza Córdova, F., Japp, D., Valderrama, D., Gopal Karmakar, K., Lengyel, P., ... & Zhang, Z. (2022). World review of capture fisheries and aquaculture insurance 2022 (Vol. 682). Food & Agriculture Org..



Funded by
the European Union



**Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών
στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"**

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Visch, W., Layton, C., Hurd, C. L., Macleod, C., & Wright, J. T. (2023). A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture—A case study from southern Australia. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1467-1479.