



Funded by
the European Union



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

Κεφάλαιο 3. Υπερθέρμανση του πλανήτη και αναπαραγωγή, βιοτεχνολογία στην υδατοκαλλιέργεια

Καθηγήτρια Halyna Krusir

Καθηγήτρια, Dr. Maryna Mardar

Αναπληρωτής καθ. Olha Sahdieieva

Εθνικό Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Οδησσού

Εισαγωγή

Τα υδάτινα οικοσυστήματα, τα οποία είναι απαραίτητα για την παγκόσμια βιοποικιλότητα και τα μέσα διαβίωσης του ανθρώπου, υφίστανται πρωτοφανείς αλλαγές λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες, που προκαλούνται από την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, διαταράσσουν τους κύκλους αναπαραγωγής, τα ποσοστά επιβίωσης και τη γενετική ακεραιότητα των υδρόβιων ειδών. Ταυτόχρονα, ο τομέας της υδατοκαλλιέργειας αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις μέσω καινοτόμων βιοτεχνολογικών λύσεων. Με την εξάρτηση του κόσμου από τους υδάτινους πόρους να αυξάνεται για την κάλυψη των απαιτήσεων επισιτιστικής ασφάλειας, η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών αναπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της επιλεκτικής αναπαραγωγής, της γονιδιωματικής επιλογής και της επεξεργασίας γονιδίων CRISPR/Cas9, προσφέρει μετασχηματιστικές δυνατότητες για την αντιμετώπιση της διπλής κρίσης της κλιματικής αλλαγής και της βιώσιμης υδατοκαλλιέργειας.

Το κεφάλαιο αυτό εμβαθύνει στην περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των περιβαλλοντικών αλλαγών και των βιοτεχνολογικών εξελίξεων στην υδατοκαλλιέργεια. Ξεκινά με τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η υπερθέρμανση του πλανήτη μεταβάλλει τους κύκλους αναπαραγωγής και τη δυναμική επιβίωσης των υδρόβιων ειδών, προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στις δομές του πληθυσμού και τις λειτουργίες του οικοσυστήματος. Στη συνέχεια, η εστίαση μετατοπίζεται σε πρωτοποριακές βιοτεχνολογικές λύσεις, όπως η επιλεκτική αναπαραγωγή και η γονιδιωματική επιλογή, οι οποίες ενισχύουν την ανθεκτικότητα και την παραγωγικότητα των ειδών υδατοκαλλιέργειας. Επιπλέον, συζητείται η επαναστατική τεχνολογία επεξεργασίας γονιδίων CRISPR/Cas9, τονίζοντας τις εφαρμογές της στη βελτίωση της αντοχής στις ασθένειες, των ρυθμών ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής προσαρμοστικότητας σε διάφορα είδη ψαριών. Τέλος, εξετάζονται οι ηθικοί, περιβαλλοντικοί και ρυθμιστικοί προβληματισμοί που περιβάλλουν αυτές τις τεχνολογίες, τονίζοντας την ανάγκη για βιώσιμη και υπεύθυνη καινοτομία στην υδατοκαλλιέργεια.

Οι επιπτώσεις αυτών των συζητήσεων είναι εκτεταμένες, επηρεάζοντας όχι μόνο το μέλλον της υδατοκαλλιέργειας αλλά και τις παγκόσμιες προσπάθειες για τον μετριασμό της απώλειας βιοποικιλότητας και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Αυτή η εισαγωγή θέτει τις βάσεις για μια ολοκληρωμένη ανάλυση των προκλήσεων και των ευκαιριών που παρουσιάζονται από την



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

ενσωμάτωση της βιοτεχνολογίας στην υδατοκαλλιέργεια υπό τη σκιά της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

1. Επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην αναπαραγωγή υδρόβιων ειδών

1.1. Αλλαγές στους κύκλους αναπαραγωγής: Οι αυξημένες θερμοκρασίες του νερού μπορούν να αλλάξουν τους κύκλους αναπαραγωγής των υδρόβιων ειδών, επηρεάζοντας τους χρόνους αναπαραγωγής, τους ρυθμούς ανάπτυξης και τα ποσοστά επιβίωσης των προνυμφών.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη, που προκαλείται από την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, έχει βαθύ αντίκτυπο στα οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των υδάτινων περιβαλλόντων. Μία από τις σημαντικότερες περιοχές που επηρεάζονται από τις αυξανόμενες θερμοκρασίες είναι η αναπαραγωγή υδρόβιων ειδών. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού μεταβάλλουν τους κύκλους αναπαραγωγής, τους χρόνους ωοτοκίας, τους ρυθμούς ανάπτυξης και τα ποσοστά επιβίωσης των απογόνων, οδηγώντας σε αλλαγές στη δομή και τη λειτουργία των υδρόβιων πληθυσμών. Αυτή η βιβλιογραφική ανασκόπηση στοχεύει να διερευνήσει πώς αυτές οι περιβαλλοντικές αλλαγές επηρεάζουν τα υδρόβια είδη, εστιάζοντας στις αλλαγές στους κύκλους αναπαραγωγής και τη γενετική προσαρμογή.

Αλλαγές στους κύκλους αναπαραγωγής. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες του νερού λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένας από τους κύριους παράγοντες αλλαγών στην αναπαραγωγική συμπεριφορά των υδρόβιων ειδών. Πολλά είδη βασίζονται σε συγκεκριμένες ενδείξεις θερμοκρασίας για να ξεκινήσουν την αναπαραγωγή. Με την αύξηση των θερμοκρασιών, ο χρόνος των αναπαραγωγικών γεγονότων έχει μετατοπιστεί και αυτές οι μετατοπίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αναντιστοιχίες μεταξύ των ειδών και των οικοτόπων τους.

Χρόνοι αναπαραγωγής. Μελέτες έχουν δείξει ότι πολλά υδρόβια είδη αναπαράγονται νωρίτερα φέτος λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών του νερού. Για παράδειγμα, είδη ψαριών όπως ο μπακαλιάρος του Ατλαντικού (*Gadus morhua*) και η ευρωπαϊκή πέρκα (*Perca fluviatilis*) έχουν παρατηρηθεί να αναπαράγονται νωρίτερα στην εποχή ως απάντηση στις αυξημένες θερμοκρασίες του νερού (Tompkins et al., 2017). Ενώ η πρόωπη ωοτοκία μπορεί αρχικά να φαίνεται ευεργετική, συχνά οδηγεί σε αναντιστοιχία με τη διαθεσιμότητα πόρων τροφής για τις προνύμφες, καθώς το φυτοπλαγκτόν, μια κύρια πηγή τροφής για πολλά νεαρά ψάρια, μπορεί να μην είναι διαθέσιμο ταυτόχρονα (Durant et al., 2007). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μειωμένα ποσοστά επιβίωσης των απογόνων, επηρεάζοντας περαιτέρω τη δυναμική του πληθυσμού.

Επιπλέον, η πρόωπη ωοτοκία δεν εγγυάται απαραίτητα την επιτυχία, καθώς τα είδη μπορούν να αναπαράχθουν πριν οι συνθήκες είναι βέλτιστες για την επιβίωση των προνυμφών. Η αναντιστοιχία στο χρονοδιάγραμμα μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο αριθμό βιώσιμων απογόνων, οδηγώντας ενδεχομένως σε μακροπρόθεσμη μείωση του πληθυσμού (O'Reilly et al., 2008).

Ρυθμοί ανάπτυξης και μεταβολικές επιδράσεις. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού επηρεάζει επίσης τους μεταβολικούς ρυθμούς των υδρόβιων ειδών. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνήθως επιταχύνουν την ανάπτυξη πολλών ειδών επιταχύνοντας τις μεταβολικές διεργασίες (Angilletta et al., 2004). Ωστόσο, αυτή η αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης μπορεί να μην είναι πάντα ευεργετική. Τα



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

είδη που αναπτύσσονται πολύ γρήγορα σε θερμότερα νερά μπορεί να μην αναπτύξουν το απαραίτητο μέγεθος ή δύναμη για να επιβιώσουν στην ενήλικη ζωή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ασθενέστερα άτομα με χαμηλότερες πιθανότητες επιτυχούς αναπαραγωγής (Heath et al., 2014). Επιπλέον, η ταχύτερη ανάπτυξη δεν συσχετίζεται πάντα με την αύξηση της αναπαραγωγικής επιτυχίας, καθώς το είδος μπορεί να αντιμετωπίσει αναντιστοιχία στο χρονοδιάγραμμα των αναπτυξιακών ορόσημων και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Ποσοστά επιβίωσης των προνυμφών. Τα πρώτα στάδια ζωής των υδρόβιων ειδών είναι συχνά τα πιο ευάλωτα στις περιβαλλοντικές αλλαγές και η αύξηση της θερμοκρασίας των υδάτων μπορεί να επιδεινώσει περαιτέρω αυτά τα τρωτά σημεία. Οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα οξυγόνου στο νερό, επηρεάζοντας τα ποσοστά επιβίωσης των προνυμφών, τα οποία απαιτούν υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου για σωστή ανάπτυξη (Pörtner et al., 2014). Επιπλέον, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να στρεσάρουν τους νεαρούς οργανισμούς, αφήνοντάς τους λιγότερο ικανούς να χειριστούν άλλες περιβαλλοντικές προκλήσεις, όπως η θήρευση ή η έλλειψη τροφής (Walther et al., 2002).

1.2. Γενετική προσαρμογή: Ορισμένα είδη μπορεί να προσαρμοστούν γενετικά στις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, ενώ άλλα μπορεί να αντιμετωπίσουν μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία ή μείωση του πληθυσμού.

Ενώ οι περιβαλλοντικές αλλαγές προκαλούν προκλήσεις για τα υδρόβια είδη, ορισμένα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν γενετικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η γενετική προσαρμογή περιλαμβάνει αλλαγές στη γενετική σύνθεση των πληθυσμών με την πάροδο του χρόνου που επιτρέπουν στα είδη να αντιμετωπίσουν περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των υψηλότερων θερμοκρασιών.

Προσαρμογή στις αλλαγές θερμοκρασίας. Η έρευνα έχει δείξει ότι ορισμένα είδη έχουν δείξει κάποιο βαθμό γενετικής προσαρμογής στις αυξανόμενες θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, μελέτες για τον γάδο του Ατλαντικού έχουν βρει στοιχεία τοπικής προσαρμογής σε ποικίλες θερμικές συνθήκες σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (Jorgensen et al., 2017). Ορισμένοι πληθυσμοί γάδου που ζουν σε θερμότερα νερά έχουν αναπτύξει γενετικά χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να αναπαράγονται με επιτυχία σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ομοίως, ορισμένα είδη ψαριών μπορεί να παρουσιάσουν αλλαγές στον αναπαραγωγικό χρόνο ή τη φυσιολογική ανοχή τους, προσαρμοζόμενα σε θερμότερα περιβάλλοντα για πολλές γενιές (Lynch et al., 2014).

Ωστόσο, η ικανότητα των ειδών να προσαρμόζονται γενετικά περιορίζεται από παράγοντες όπως η γενετική ποικιλότητα και η ταχύτητα με την οποία συμβαίνουν οι περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα είδη με χαμηλή γενετική ποικιλότητα ή εκείνα που βρίσκονται σε ταχέως θερμαινόμενα ενδιαιτήματα μπορεί να δυσκολευτούν να προσαρμοστούν αρκετά γρήγορα για να αποφύγουν τη μείωση του πληθυσμού (Fischer et al., 2014). Επιπλέον, η διαδικασία γενετικής προσαρμογής είναι αργή και ο ρυθμός θέρμανσης μπορεί να υπερβεί την ικανότητα ορισμένων ειδών να προσαρμοστούν γενετικά εγκαίρως.

Μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία και μείωση του πληθυσμού. Ενώ ορισμένα είδη μπορούν να προσαρμοστούν επιτυχώς στις υψηλές θερμοκρασίες, άλλα μπορεί να αντιμετωπίσουν προκλήσεις που μειώνουν την αναπαραγωγική τους επιτυχία ή οδηγούν σε μείωση του πληθυσμού. Για παράδειγμα, είδη με εξειδικευμένες απαιτήσεις αναπαραγωγής, όπως εκείνα που βασίζονται σε πολύ



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

συγκεκριμένα εύρη θερμοκρασιών για αναπαραγωγή, μπορεί να δυσκολευτούν να αντιμετωπίσουν τις ταχείες μεταβολές της θερμοκρασίας που προκαλούνται από την υπερθέρμανση του πλανήτη (Parmesan, 2006). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αναπαραγωγική επιτυχία μπορεί να μειωθεί και οι πληθυσμοί μπορεί να βιώσουν μείωση του αριθμού ή ακόμα και τοπικές εξαφανίσεις.

Τα είδη που δεν προσαρμόζονται γενετικά στις αυξανόμενες θερμοκρασίες μπορεί να μην είναι σε θέση να αναπαραχθούν επιτυχώς στα ενδιαιτήματά τους, οδηγώντας σε απώλεια γενετικής ποικιλότητας και μειώνοντας περαιτέρω τις πιθανότητες επιβίωσής τους ενόψει της κλιματικής αλλαγής (Chevin et al., 2010).

Ο αντίκτυπος της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην αναπαραγωγή υδρόβιων ειδών είναι πολύπλευρος, περιλαμβάνοντας αλλαγές στους κύκλους αναπαραγωγής, αλλαγές στους ρυθμούς ανάπτυξης και μεταβολές στα ποσοστά επιβίωσης των απογόνων. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες έχουν οδηγήσει σε πρώιμη ωοτοκία σε πολλά είδη, αλλά αυτό μπορεί να προκαλέσει αναντιστοιχία με τη διαθεσιμότητα τροφής και τις βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα χαμηλότερα ποσοστά επιβίωσης για τις προνύμφες. Ενώ ορισμένα είδη μπορεί να είναι σε θέση να προσαρμοστούν γενετικά στις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, ο ρυθμός της περιβαλλοντικής αλλαγής μπορεί να υπερβεί την ικανότητά τους να το πράξουν, οδηγώντας σε μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία και πιθανή μείωση του πληθυσμού. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων συνεπειών αυτών των αλλαγών στα υδάτινα οικοσυστήματα και για την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα είδη αυτά.

2. Βιοτεχνολογικές εξελίξεις στην εκτροφή υδατοκαλλιέργειας

2.1 Επιλεκτική αναπαραγωγή: Χρήση τεχνικών επιλεκτικής αναπαραγωγής για την ανάπτυξη στελεχών ψαριών και οστρακοειδών που είναι πιο ανθεκτικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες και άλλες πιέσεις που σχετίζονται με το κλίμα.

Η υδατοκαλλιέργεια είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας, που συμβάλλει σημαντικά στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια. Καθώς το κλίμα συνεχίζει να αλλάζει, η υδατοκαλλιέργεια αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις, όπως οι αυξανόμενες θερμοκρασίες και τα συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, οι βιοτεχνολογικές εξελίξεις, ιδίως όσον αφορά την επιλεκτική αναπαραγωγή και τη γονιδιωματική επιλογή, εφαρμόζονται όλο και περισσότερο για την ανάπτυξη ειδών υδατοκαλλιέργειας που είναι πιο ανθεκτικά στις πιέσεις που σχετίζονται με το κλίμα.

Επιλεκτική αναπαραγωγή

Η επιλεκτική αναπαραγωγή αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της υδατοκαλλιέργειας εδώ και δεκαετίες, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της παραγωγικότητας και της ανθεκτικότητας των εκτρεφόμενων ειδών. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επιλογή ατόμων με επιθυμητά χαρακτηριστικά για αναπαραγωγή, βελτιώνοντας έτσι σταδιακά τη γενετική σύνθεση των πληθυσμών. Η παραδοσιακή επιλεκτική αναπαραγωγή στην υδατοκαλλιέργεια έχει επικεντρωθεί σε χαρακτηριστικά όπως ο ρυθμός ανάπτυξης, η αντοχή στις ασθένειες και η αποτελεσματικότητα μετατροπής των ζωοτροφών. Με την κλιματική αλλαγή να εντείνει τους περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες, δίνεται



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

αυξανόμενη έμφαση στην αναπαραγωγή χαρακτηριστικών που προσδίδουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις αυξημένες θερμοκρασίες του νερού και σε άλλες προκλήσεις που σχετίζονται με το κλίμα.

Έρευνες έχουν δείξει ότι η επιλεκτική αναπαραγωγή μπορεί να βοηθήσει τα είδη υδατοκαλλιέργειας, όπως τα ψάρια και τα οστρακοειδή, να προσαρμοστούν σε θερμότερα περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, μελέτες σχετικά με τον σολομό του Ατλαντικού έχουν δείξει ότι η επιλεκτική αναπαραγωγή μπορεί να ενισχύσει την ανοχή στη θερμότητα, επιτρέποντας ενδεχομένως στους εκτρεφόμενους πληθυσμούς να επιβιώσουν σε θερμότερα νερά που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή (Gjøsøn et al., 2018). Επιπλέον, τα προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής επικεντρώνονται όλο και περισσότερο σε χαρακτηριστικά όπως η αντοχή στις ασθένειες και η ικανότητα αντοχής σε υποξικές συνθήκες, οι οποίες είναι πιθανό να γίνουν πιο διαδεδομένες καθώς αυξάνονται οι θερμοκρασίες του νερού (Houston et al., 2018).

Η επιλεκτική αναπαραγωγή για την ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή περιλαμβάνει επίσης την ενίσχυση των χαρακτηριστικών συμπεριφοράς. Για παράδειγμα, τα ψάρια που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανοχή σε στρεσογόνους παράγοντες όπως ο συνωστισμός και ο χειρισμός μπορούν να αντέξουν καλύτερα τις σκληρότερες συνθήκες που δημιουργούνται από την κλιματική αλλαγή (Huntingford et al., 2020). Αυτά τα προγράμματα αναπαραγωγής έχουν ως στόχο να διασφαλίσουν ότι τα είδη υδατοκαλλιέργειας μπορούν να συνεχίσουν να ευδοκιμούν υπό ένα μεταβαλλόμενο κλίμα, συμβάλλοντας στη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα.

2.2 Γονιδιωματική επιλογή: Εφαρμογή γονιδιωματικών εργαλείων για τον εντοπισμό και τη διάδοση επιθυμητών χαρακτηριστικών, ενισχύοντας την ικανότητα των ειδών υδατοκαλλιέργειας να ευδοκιμούν σε ένα μεταβαλλόμενο κλίμα.

Η χρήση της σύγχρονης βιοτεχνολογίας για την ενίσχυση της παραγωγής υδρόβιων ειδών έχει μεγάλες δυνατότητες όχι μόνο για την κάλυψη της ζήτησης αλλά και για τη βελτίωση της υδατοκαλλιέργειας. Η γενετική τροποποίηση και η βιοτεχνολογία προσφέρουν επίσης τεράστιες δυνατότητες βελτίωσης της ποιότητας και της ποσότητας των ψαριών που εκτρέφονται στην υδατοκαλλιέργεια. Υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για υδατοκαλλιέργεια· Η βιοτεχνολογία μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση αυτής της ζήτησης. Όπως συμβαίνει με όλα τα τρόφιμα ενισχυμένα με βιοτεχνολογία, η υδατοκαλλιέργεια θα ρυθμίζεται αυστηρά πριν εγκριθεί για κυκλοφορία. Η βιοτεχνολογική υδατοκαλλιέργεια προσφέρει επίσης περιβαλλοντικά οφέλη. Όταν ενσωματωθεί κατάλληλα με άλλες τεχνολογίες για την παραγωγή τροφίμων, γεωργικών προϊόντων και υπηρεσιών, η βιοτεχνολογία μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην κάλυψη των αναγκών ενός αυξανόμενου και όλο και περισσότερο αστικοποιημένου πληθυσμού στην επόμενη χιλιετία. Η επιτυχής ανάπτυξη και εφαρμογή της βιοτεχνολογίας είναι δυνατή μόνο όταν υπάρχει μια ευρεία βάση έρευνας και γνώσης στη βιολογία, την παραλλαγή, την αναπαραγωγή, τη γεωπονία, τη φυσιολογία, την παθολογία, τη βιοχημεία και τη γενετική του χειραγωγημένου οργανισμού. Τα οφέλη που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες δεν μπορούν να επιτευχθούν χωρίς συνεχή δέσμευση για βασική έρευνα. Τα βιοτεχνολογικά προγράμματα πρέπει να είναι πλήρως ενσωματωμένα σε ένα ερευνητικό υπόβαθρο και δεν μπορούν να βγουν εκτός πλαισίου για να επιτύχουν.

Το σχήμα 2.1 δείχνει το ρόλο της βιοτεχνολογίας στην ενίσχυση της παραγωγής ψαριών.

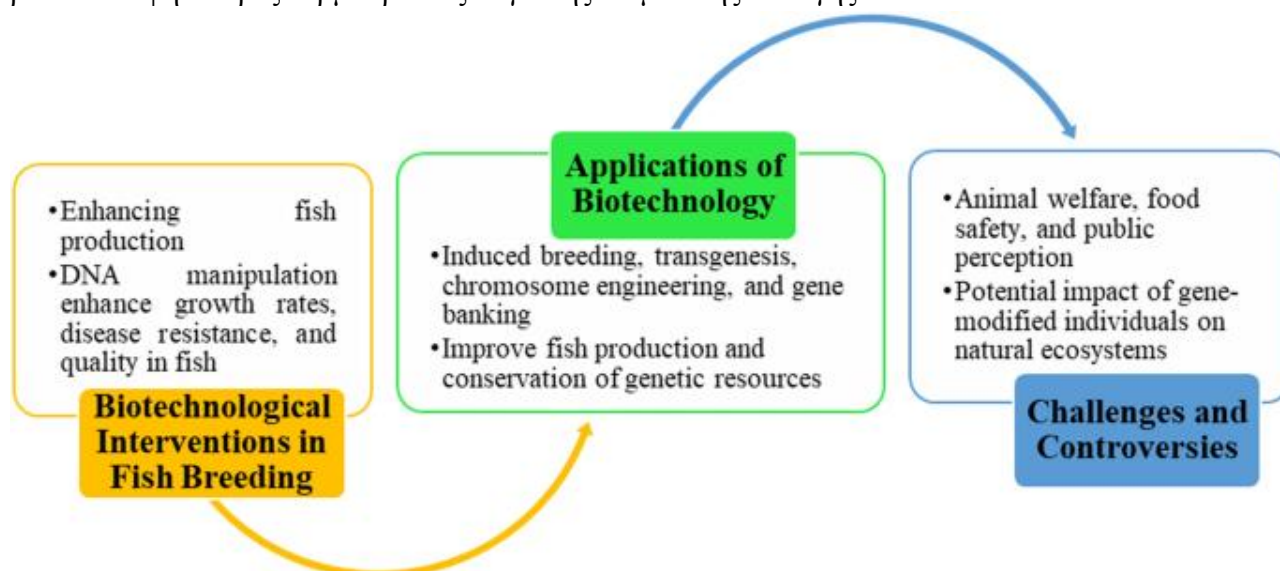


Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCá]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Η γονιδιωματική επιλογή, η οποία χρησιμοποιεί γονιδιωματικά εργαλεία για τον εντοπισμό και τη διάδοση επιθυμητών χαρακτηριστικών, αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό άλμα προς τα εμπρός στην εκτροφή υδατοκαλλιέργειας. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη συσχέτιση γενετικών δεικτών με χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική επιλογή. Η γονιδιωματική επιλογή μπορεί να επιταχύνει τα προγράμματα αναπαραγωγής, επιτρέποντας στους εκτροφείς να εντοπίζουν άτομα με το καλύτερο γενετικό δυναμικό για ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες.

Μία από τις πιο ελπιδοφόρες εφαρμογές της γονιδιωματικής επιλογής στην υδατοκαλλιέργεια είναι η βελτίωση της αντοχής στη θερμότητα. Μια μελέτη για την ιριδίζουσα πέστροφα (*Oncorhynchus mykiss*) διαπίστωσε ότι η γονιδιωματική επιλογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό δεικτών που συνδέονται με την ανοχή στη θερμότητα, επιτρέποντας την ανάπτυξη στελεχών που είναι καλύτερα εξοπλισμένα για να επιβιώσουν σε θερμότερα νερά (Liu et al., 2020). Με την εφαρμογή γονιδιωματικής επιλογής σε προγράμματα αναπαραγωγής, τα είδη υδατοκαλλιέργειας μπορούν να προσαρμοστούν γενετικά για να ευδοκιμήσουν σε περιβάλλοντα που αναμένεται να βιώσουν υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω της κλιματικής αλλαγής.



Σχήμα 2.1. Ο ρόλος της βιοτεχνολογίας στην ενίσχυση της παραγωγής ψαριών (Yang et al., 2021).

Εκτός από την ανοχή στη θερμότητα, η γονιδιωματική επιλογή χρησιμοποιείται για τη βελτίωση άλλων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το κλίμα, όπως η αντοχή στις ασθένειες και η ικανότητα επιβίωσης σε περιβάλλοντα χαμηλού οξυγόνου. Για παράδειγμα, γονιδιωματικά εργαλεία χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό γενετικών δεικτών που σχετίζονται με την αντοχή στο παθογόνο *Vibrio anguillarum*, το οποίο αποτελεί σημαντική απειλή για τα είδη υδατοκαλλιέργειας σε θερμότερα νερά (Vázquez et al., 2018). Με τη χρήση της γονιδιωματικής επιλογής για την αναπαραγωγή ψαριών που είναι πιο ανθεκτικά στις ασθένειες, τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας μπορούν να γίνουν πιο βιώσιμα και λιγότερο εξαρτημένα από αντιβιοτικά, τα οποία εξετάζονται όλο και περισσότερο λόγω των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Η γονιδιωματική επιλογή ενσωματώνεται επίσης στην παραδοσιακή επιλεκτική αναπαραγωγή για τη μεγιστοποίηση του γενετικού κέρδους. Ο συνδυασμός γονιδιωματικών πληροφοριών με φαινοτυπικά δεδομένα επιτρέπει στους εκτροφείς να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τα



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

άτομα που θα επιλέξουν για αναπαραγωγή. Για παράδειγμα, τα γονιδιωματικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης των απογόνων, συμβάλλοντας στην αποφυγή ζητημάτων όπως η ενδογαμία και διασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη γενετική υγεία των πληθυσμών υδατοκαλλιέργειας (Gjøsøn et al., 2018).

Ενσωμάτωση της επιλεκτικής αναπαραγωγής και της γονιδιωματικής επιλογής

Η ενσωμάτωση της επιλεκτικής αναπαραγωγής και της γονιδιωματικής επιλογής θεωρείται ισχυρή στρατηγική για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας των ειδών υδατοκαλλιέργειας έναντι της κλιματικής αλλαγής. Η επιλεκτική αναπαραγωγή παρέχει μια σταθερή βάση βελτιώνοντας χαρακτηριστικά όπως ο ρυθμός ανάπτυξης και η αντοχή στις ασθένειες, ενώ η γονιδιωματική επιλογή επιταχύνει τη διαδικασία και ενισχύει την ακρίβεια των προγραμμάτων αναπαραγωγής. Μαζί, αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη στελεχών που είναι καλύτερα προσαρμοσμένα στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην περίπτωση του σολομού του Ατλαντικού, για παράδειγμα, τόσο η επιλεκτική αναπαραγωγή όσο και η γονιδιωματική επιλογή έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία στελεχών που είναι πιο ανθεκτικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ασθένειες (Gjøsøn et al., 2018). Ο συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων έχει τη δυνατότητα να αυξήσει σημαντικά τη βιωσιμότητα της υδατοκαλλιέργειας αναπτύσσοντας στελέχη που μπορούν να ευδοκιμήσουν σε θερμότερες και πιο μεταβλητές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις

Ενώ οι βιοτεχνολογικές εξελίξεις υπόσχονται πολλά για τη βελτίωση της ιχθυοκαλλιέργειας, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μία από τις βασικές ανησυχίες είναι η πιθανότητα γενετικής ομογενοποίησης σε εκτρεφόμενους πληθυσμούς, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάθλιψη ενδογαμίας και μειωμένη γενετική ποικιλότητα. Είναι ζωτικής σημασίας για τα προγράμματα αναπαραγωγής να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τη γενετική ποικιλότητα, διασφαλίζοντας ότι τα είδη υδατοκαλλιέργειας παραμένουν προσαρμόσιμα στις μελλοντικές περιβαλλοντικές αλλαγές (Houston et al., 2018).

Επιπλέον, η εφαρμογή της γονιδιωματικής επιλογής απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε γονιδιωματικούς πόρους, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης υψηλής ποιότητας γονιδιωμάτων αναφοράς και γενετικών δεικτών. Ενώ τα γονιδιωματικά εργαλεία έχουν γίνει πιο προσβάσιμα τα τελευταία χρόνια, το κόστος και η πολυπλοκότητα αυτών των εργαλείων εξακολουθούν να αποτελούν εμπόδιο για ορισμένους κλάδους υδατοκαλλιέργειας (Huntingford et al., 2020).

Παρά τις προκλήσεις αυτές, η συνεχής ανάπτυξη γονιδιωματικών τεχνολογιών, σε συνδυασμό με την πρόοδο των υπολογιστικών εργαλείων και των στρατηγικών αναπαραγωγής, έχει μεγάλες δυνατότητες βελτίωσης της ανθεκτικότητας των ειδών υδατοκαλλιέργειας στην κλιματική αλλαγή.

Συμπέρασμα

Η βιοτεχνολογική πρόοδος στην εκτροφή υδατοκαλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένης της επιλεκτικής αναπαραγωγής και της γονιδιωματικής επιλογής, προσφέρει ελπιδοφόρες λύσεις στις προκλήσεις που θέτει η κλιματική αλλαγή. Ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των ειδών υδατοκαλλιέργειας στις αυξανόμενες θερμοκρασίες, τις ασθένειες και άλλους περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν στη διασφάλιση της βιωσιμότητας του κλάδου. Η ενσωμάτωση της γονιδιωματικής επιλογής με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις αναπαραγωγής είναι πιθανό να αποτελέσει βασική στρατηγική για την ανάπτυξη πιο ανθεκτικών στο κλίμα στελεχών ψαριών και οστρακοειδών. Καθώς ο τομέας της υδατοκαλλιέργειας



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

εξακολουθεί να αντιμετωπίζει τις πιέσεις της κλιματικής αλλαγής, αυτές οι βιοτεχνολογικές καινοτομίες θα διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση ότι η υδατοκαλλιέργεια παραμένει βιώσιμη και βιώσιμη πηγή τροφίμων για τον παγκόσμιο πληθυσμό.

3. Γενετική Μηχανική και CRISPR

3.1. Γενετική Μηχανική στην Υδατοκαλλιέργεια

Η χρήση βιοτεχνολογικών μεθόδων για τη βελτίωση της ευημερίας των καλλιεργούμενων οργανισμών, την αύξηση της παραγωγικότητας και την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων έχει αποφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Εμβόλια και ανοσοδιεγερτικά, προβιοτικά, πρεβιοτικά, συμβιωτικά, παραπροβιοτικά, θεραπεία φάγων, αντιμικροβιακά πεπτίδια, γονιδιακή θεραπεία, παρεμβολή RNA και άλλες βιοτεχνολογικές θεραπείες είναι μεταξύ αυτών. Οι γενετικές εξελίξεις στην υδατοκαλλιέργεια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αύξηση της παραγωγικότητας, στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Παραδείγματα μεθόδων για την επεξεργασία γονιδιωμάτων ψαριών περιλαμβάνουν το CRISPR-Cas9, νουκλεάσες τελεστή που μοιάζουν με ενεργοποιητή μεταγραφής και νουκλεάσες ψευδαργύρου-δακτύλου. Η μοριακή βιολογία και η διαγένεση, η τράπεζα γονιδίων, ο χειρισμός χρωμοσωμάτων, οι ορμονικές θεραπείες, η εκτροφή ψαριών με έναν ή περισσότερους γονείς, η δημιουργία ψαριών με διαφορετικό αριθμό κυττάρων (πολυπλοειδές, τριπλοειδές, απλοειδές, γυναικογενετικό και ανδρογενετικό) και η χρήση συνθετικών ορμονών στην αναπαραγωγή ψαριών είναι άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιοτεχνολογία ψαριών.

Οι καινοτομίες στις βιοτεχνολογικές τεχνολογίες έχουν φέρει επανάσταση στη γενετική αναπαραγωγή ψαριών, οδηγώντας σε σημαντικές εξελίξεις στον κλάδο της υδατοκαλλιέργειας (Yang et al., 2021).

Τεχνικές όπως η γενετική μηχανική και η CRISPR-Cas9 επέτρεψαν την ακριβή τροποποίηση των γονιδιωμάτων των ψαριών, με αποτέλεσμα στελέχη με αυξημένους ρυθμούς ανάπτυξης, αντοχή στις ασθένειες και βελτιωμένη αποτελεσματικότητα μετατροπής τροφής. Τα προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής έχουν βελτιστοποιηθεί μέσω επιλογής με τη βοήθεια δεικτών, επιτρέποντας την ταυτοποίηση και τη διάδοση των επιθυμητών γενετικών χαρακτηριστικών πιο αποτελεσματικά. Επιπλέον, οι αναπαραγωγικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της ωοτοκίας που προκαλείται από ορμόνες και της κρυοσυντήρησης γαμετών, έχουν ενισχύσει την επιτυχία αναπαραγωγής και τη γενετική ποικιλότητα. Αυτές οι βιοτεχνολογικές εξελίξεις έχουν συμβάλει σε πιο βιώσιμες και παραγωγικές πρακτικές ιχθυοκαλλιέργειας, ικανοποιώντας την αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για θαλασσινά. Τα εργαλεία αυτά διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην αποφυγή της εξαφάνισης απειλούμενων ειδών ιχθύων και στη βελτίωση της εμπορικής παραγωγής ιχθύων. Επιπλέον, άλλες βιοτεχνολογικές μέθοδοι, όπως η χρήση συνθετικών ορμονών, η παραγωγή monosex και η διαγένεση, συμβάλλουν στην πρόοδο της αναπαραγωγής ψαριών. Τα εργαλεία αυτά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη της εξαφάνισης απειλούμενων ειδών ψαριών και στην ενίσχυση της εμπορικής παραγωγής ιχθύων. Επιπλέον, άλλες βιοτεχνολογικές μέθοδοι, όπως η χρήση συνθετικών ορμονών, η παραγωγή monosex και η διαγένεση, συμβάλλουν σημαντικά στην πρόοδο της ιχθυοκαλλιέργειας. Το σχήμα 2.2 δείχνει τις διάφορες βιοτεχνολογικές καινοτομίες στην αναπαραγωγή ψαριών (Sankaran & Mandal, 2024).



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247



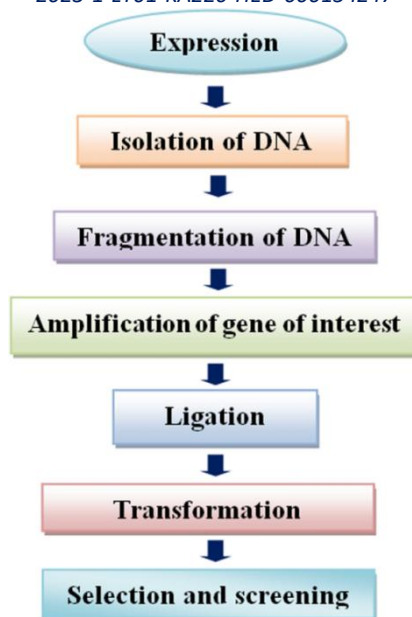
Σχήμα 2.2. Βιοτεχνολογικές καινοτομίες στην ιχθυοκαλλιέργεια

Η γενετική ποικιλότητα αντιπροσωπεύει έναν σημαντικό πόρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έναρξη προγραμμάτων επιλεκτικής αναπαραγωγής, τα οποία αποδεδειγμένα βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του τομέα της υδατοκαλλιέργειας. Η διευκόλυνση της μεταφοράς κατάρτισης και τεχνολογίας σε διάφορους τομείς υδατοκαλλιέργειας μπορεί να ωφελήσει σημαντικά τα είδη χαμηλότερης αξίας, ενισχύοντας την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητά τους.

Το γονιδίωμα ενός οργανισμού μπορεί να τροποποιηθεί με την εισαγωγή συνθετικού DNA από διάφορες πηγές χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως τεχνολογία ανασυνδυασμένου DNA. Η εμφύτευση ενός γενετικού θραύσματος που περιέχει το γονίδιο-στόχο μας σε ένα υπάρχον γονιδίωμα είναι το πρώτο βήμα στη διαδικασία. Σε αυτή την τεχνική, τα ένζυμα περιορισμού, οι φορείς και τα κύτταρα ξενιστές χρησιμοποιούνται ως εργαλεία. Μια ποικιλία ενζύμων εμπλέκονται στις διαδικασίες κοπής, σύνθεσης και δέσμευσης. Ένζυμα όπως τα περιοριστικά ένζυμα αποτελούν μέρος αυτής της ομάδας. Για τη μεταφορά και την ενσωμάτωση γονιδίων-στόχων, οι φορείς είναι χρήσιμοι. Οι εφαρμογές της τεχνολογίας ανασυνδυασμένου DNA περιλαμβάνουν την κλωνοποίηση γονιδίων, τη γονιδιακή θεραπεία και τη γεωργία. Το σχήμα 2.3 δείχνει τα διάφορα βήματα που εμπλέκονται στην τεχνολογία ανασυνδυασμένου DNA (Sankaran & Mandal, 2024).



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



Σχήμα 2.3 Κύρια βήματα που εμπλέκονται στην τεχνολογία ανασυνδυασμένου DNA (Sankaran & Mandal, 2024)

3.2. CRISPR στην υδατοκαλλιέργεια

Το CRISPR / Cas9 αντιπροσωπεύει ένα επαναστατικό εργαλείο στη γενετική μηχανική, επιτρέποντας ακριβείς και στοχευμένες τροποποιήσεις του DNA των ψαριών για την ενίσχυση χαρακτηριστικών όπως η μελάγχρωση, η ανάπτυξη, η ποιότητα των μυών και η αντοχή στις ασθένειες. Αυτή η τεχνολογία ξεπερνά τις παραδοσιακές μεθόδους αναπαραγωγής προσφέροντας μια φθηνότερη, ευκολότερη και ακριβέστερη προσέγγιση στη γενετική ενίσχυση. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν τη βελτίωση της απόδοσης ανάπτυξης (π.χ. σωματικό βάρος, μήκος και μυϊκή ανάπτυξη), την ποιότητα των μυών, την αντίσταση στις ασθένειες και τον προσδιορισμό του φύλου. Επιπλέον, το CRISPR/Cas9 παρέχει πολλά υποσχόμενες λύσεις για την αύξηση της αντοχής στις ασθένειες, στοχεύοντας γονίδια που σχετίζονται με το ανοσοποιητικό σύστημα και οδούς αναγνώρισης παθογόνων, μειώνοντας την ανάγκη για αντιβιοτικά και χημικές θεραπείες. Αυτή η τεχνολογία έχει προωθήσει σημαντικά την υδατοκαλλιέργεια βελτιστοποιώντας γενετικά τα βασικά χαρακτηριστικά στα είδη ψαριών. Για παράδειγμα, οι ερευνητές χειρίστηκαν με επιτυχία τα γεννητικά κύτταρα στον σολομό του Ατλαντικού για να ελέγξουν τη διαφοροποίηση των αναπαραγωγικών κυττάρων, βελτίωσαν την αποτελεσματικότητα μετατροπής της τροφής για ανάπτυξη στο κίτρινο γατόψαρο, πέτυχαν στοχευμένες τροποποιήσεις γονιδίων στην τιλάπια και ελαχιστοποίησαν τις ακούσιες επιδράσεις εκτός στόχου (Zhu et al., 2024).

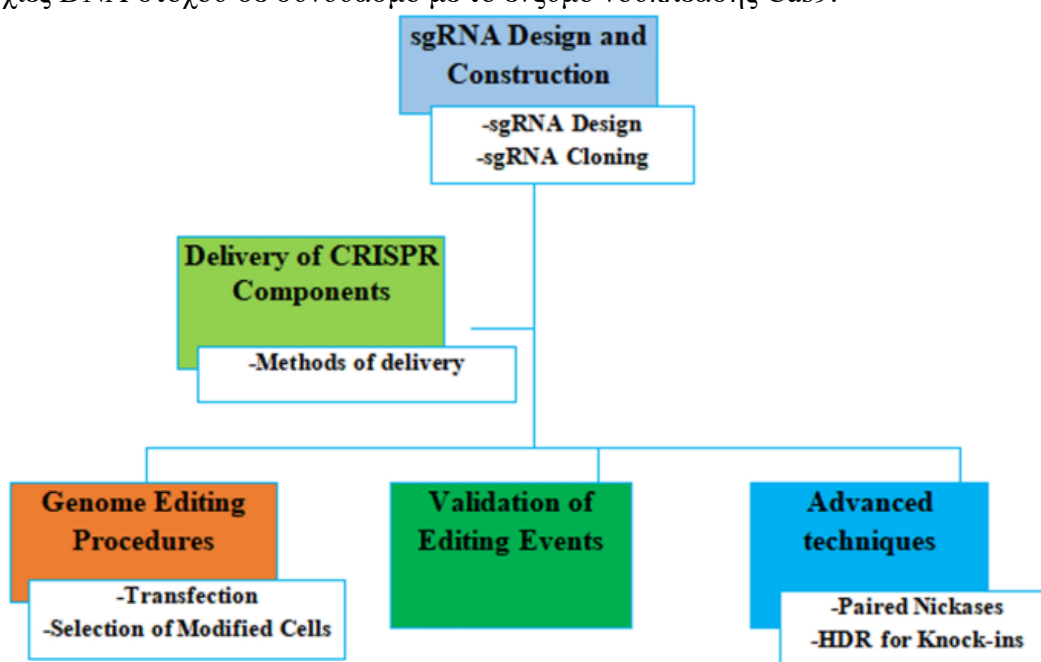
Το σχήμα 2.4 δείχνει τις μεθόδους CRISPR/Cas9 που εμπλέκονται στην επεξεργασία γονιδίων. Το ένζυμο Cas9 και το RNA οδηγός είναι τα δύο κύρια μέρη του συστήματος. Μια βελτιωμένη παραλλαγή του αντιικού αμυντικού συστήματος CRISPR-Cas9 που βρίσκεται στα βακτήρια χρησιμεύει ως βάση για το σύστημα CRISPR-Cas9. Η *in vivo* επεξεργασία γονιδίων καθίσταται δυνατή με την εισαγωγή ενός συνθετικού RNA οδηγού (gRNA) συμπλοκοποιημένου με τη νουκλεάση Cas9 σε ένα κύτταρο και στη συνέχεια κόβοντας το γονιδίωμα σε μια συγκεκριμένη θέση. Επειδή επιτρέπει την εύκολη, προσιτή και ακριβή επεξεργασία των γονιδιωμάτων *in vivo*, αυτή η μέθοδος είναι βαθιά σημαντική στη βιοτεχνολογία και την ιατρική. Εκτός από τη δυνητική



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

χρησιμότητά του στη διαχείριση παρασίτων και ασθενειών, έχει και άλλες πιθανές εφαρμογές στην ανάπτυξη νέων γεωργικών προϊόντων, γενετικά τροποποιημένων οργανισμών και φαρμακευτικών προϊόντων. Επιπλέον, δείχνει πολλά υποσχόμενη στη διαχείριση κληρονομικών διαταραχών και διαταραχών που προκαλούνται από σωματικές μεταλλάξεις, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου. Το σύστημα CRISPR/Cas9 προσφέρει μια απλή μέθοδο καθοδηγούμενη από RNA για την πρόκληση στοχευμένων αλλοιώσεων σε συγκεκριμένα σημεία. Ορισμένοι φαινότυποι, συμπεριλαμβανομένου του χρώματος των ματιών ή της ευαισθησίας σε ασθένειες, μπορούν να προκληθούν από αυτές τις αλλοιώσεις του DNA. Το σύστημα χρησιμοποιεί μόρια RNA σχεδιασμένα να ταιριάζουν με αλληλουχίες DNA στόχου σε συνδυασμό με το ένζυμο νουκλεάσης Cas9.



Σχήμα 2.4. Επεξεργασία γονιδίων CRISPR/Cas9 (Sankaran & Mandal, 2024)

Αν και η CRISPR/Cas9 έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τομέα της γενετικής μηχανικής, δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Η ακρίβεια της επεξεργασίας του γονιδιώματος είναι μια σημαντική ανησυχία, καθώς οδηγεί σε μόνιμες αλλαγές στο γονιδίωμα. Επιπλέον, η χρήση του στην ανθρώπινη γενετική τροποποίηση βλαστικής σειράς είναι εξαιρετικά αμφιλεγόμενη. Γενικά, η χρήση της επεξεργασίας γονιδίων CRISPR/Cas9 έχει την ικανότητα να φέρει επανάσταση στους τομείς της βιοτεχνολογίας και της ιατρικής. Ωστόσο, η άσκηση σύνεσης και η εξέταση των ηθικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την εφαρμογή της είναι ζωτικής σημασίας (Sankaran & Mandal, 2024).

3.2.1. Αντοχή στις ασθένειες

Η ανθεκτικότητα στις ασθένειες είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό στην υδατοκαλλιέργεια, αντανakλώντας την ικανότητα ενός είδους να αντέχει σε λοιμώξεις, κακή ποιότητα νερού και περιβαλλοντικές αλλαγές. Η επεξεργασία γονιδιώματος με τη μεσολάβηση CRISPR / Cas9 έχει αναδειχθεί ως μια ισχυρή μέθοδος για την ενίσχυση αυτής της αντίστασης. Με την ενσωμάτωση αντιμικροβιακών πεπτιδικών γονιδίων (AMGs) στα γονιδιώματα των ψαριών, το CRISPR / Cas9 μειώνει τον βακτηριακό αποικισμό, αυξάνει την επιβίωση μετά τη μόλυνση και μεταβάλλει την έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με το ανοσοποιητικό. Αυτή η επεξεργασία ακριβείας έχει οδηγήσει σε σημαντικές προόδους, όπως η ενίσχυση της αντοχής στη λοιμώδη παγκρεατική νέκρωση



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

(IPN) και τη βακτηριακή ασθένεια κρύου νερού στον σολομό και η στόχευση του γονιδίου JAM-A στον κυπρίνο χόρτου για να εμποδίσει την είσοδο του ιού, προσδίδοντας ανοσία στον ρεοϊό κυπρίνου χόρτου (GCRV).

Στην τιλάπια, το CRISPR/Cas9 έχει επεξεργαστεί γονίδια που συνδέονται με ανοσολογικές αποκρίσεις, βελτιώνοντας την αντίσταση σε βακτηριακά παθογόνα όπως *Streptococcus agalactiae* και *Aeromonas hydrophila*. Ομοίως, στο γατόψαρο, αυτή η τεχνολογία έχει στοχεύσει σε ανοσορυθμιστικά γονίδια, αυξάνοντας τα ποσοστά επιβίωσης μετά την έκθεση σε παθογόνα. Αυτές οι εξελίξεις έχουν συμπληρωθεί από τεχνικές χτυπήματος για την εισαγωγή ξένων γονιδίων, βελτιώνοντας την αντοχή στις ασθένειες ενισχύοντας παράλληλα την ανάπτυξη και τη θρεπτική αξία σε είδη όπως η τιλάπια και το γατόψαρο (Zhu et al., 2024).

3.2.2. Ανάπτυξη ψαριών και ποιότητα μυών

Το CRISPR/Cas9 έχει συμβάλει στη βελτίωση των ρυθμών ανάπτυξης και της ποιότητας των μυών σε όλα τα είδη υδατοκαλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένης της τιλάπιας του Νείλου, του γατόψαρου καναλιού, του κοινού κυπρίνου και της ιριδίζουσας πέστροφας. Στοχεύοντας γονίδια που σχετίζονται με την αυξητική ορμόνη, όπως η *μυοστατίνη* (*mstn*), η οποία αναστέλλει την ανάπτυξη των μυών, οι ερευνητές έχουν επιτύχει σημαντικές βελτιώσεις στη σωματική μάζα και την ανάπτυξη των μυών. Για παράδειγμα, το γατόψαρο καναλιού με διαταραγμένα γονίδια *mstn* έδειξε αύξηση 29,7% στο σωματικό βάρος, ενώ παρόμοιες τροποποιήσεις στη χωματίδα ελιάς και την τσιπούρα ενίσχυσαν τη μυϊκή μάζα και το βελτιστοποιημένο εμπορικό μέγεθος ψαριών.

Πέρα από την ανάπτυξη, το CRISPR/Cas9 επιτρέπει τη μελέτη αναπτυξιακών διαδικασιών και μοντέλων ανθρώπινων ασθενειών χρησιμοποιώντας το ψάρι-ζέβρα, έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο οργανισμό για γενετική έρευνα. Οι διαγονιδιακές τεχνικές έχουν προωθήσει περαιτέρω την ιχθυοκαλλιέργεια υπερεκφράζοντας γονίδια αυξητικής ορμόνης σε είδη όπως ο σολομός του Ατλαντικού, επιτυγχάνοντας ταχεία ανάπτυξη και υψηλότερες αποδόσεις για την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης πρωτεϊνών. Αυτές οι γενετικές τροποποιήσεις, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποιημένη διατροφή και την επιλεκτική αναπαραγωγή, ενισχύουν την υφή των μυών και τη συνολική αποτελεσματικότητα της υδατοκαλλιέργειας (Zhu et al., 2024).

3.2.3. Επιδράσεις εκτός στόχου σε CRISPR/Cas9

Ενώ η CRISPR/Cas9 προσφέρει απaráμιλλη ακρίβεια, τα αποτελέσματα εκτός στόχου παραμένουν ανησυχητικά. Αυτές οι ακούσιες επεξεργασίες μπορούν να επηρεάσουν περιοχές γονιδιώματος που δεν αποτελούν στόχο, προκαλώντας ενδεχομένως δυσμενείς επιπτώσεις. Οι πρόσφατες εξελίξεις, συμπεριλαμβανομένων των παραλλαγών Cas9 υψηλής πιστότητας (π.χ. SpCas9-HF1, eSpCas9), έχουν μειώσει σημαντικά τη δραστηριότητα εκτός στόχου. Βελτιωμένος σχεδιασμός οδηγού RNA (gRNA) και αλγόριθμοι όπως το CRISPR-DO έχουν βελτιωμένη εξειδίκευση. Επιπλέον, νέα εργαλεία όπως οι βασικοί και πρωταρχικοί επεξεργαστές επιτρέπουν ακριβείς τροποποιήσεις γονιδιώματος χωρίς να προκαλούν σπασίματα διπλού κλώνου, ελαχιστοποιώντας τις μεταλλάξεις εκτός στόχου. Τα προηγμένα συστήματα χορήγησης, όπως τα νανοσωματίδια και οι ιικοί φορείς, αυξάνουν περαιτέρω την ακρίβεια στις εφαρμογές επεξεργασίας γονιδίων.

Το ψάρι-ζέβρα και άλλα είδη υδατοκαλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένης της τιλάπιας και του σολομού του Ατλαντικού, έχουν επωφεληθεί από αυτές τις εξελίξεις. Η επεξεργασία υψηλής πιστότητας επέτρεψε στους ερευνητές να ενισχύσουν την ανάπτυξη, την αντοχή στις ασθένειες και άλλα χαρακτηριστικά, διατηρώντας παράλληλα τη γονιδιωματική ακεραιότητα.

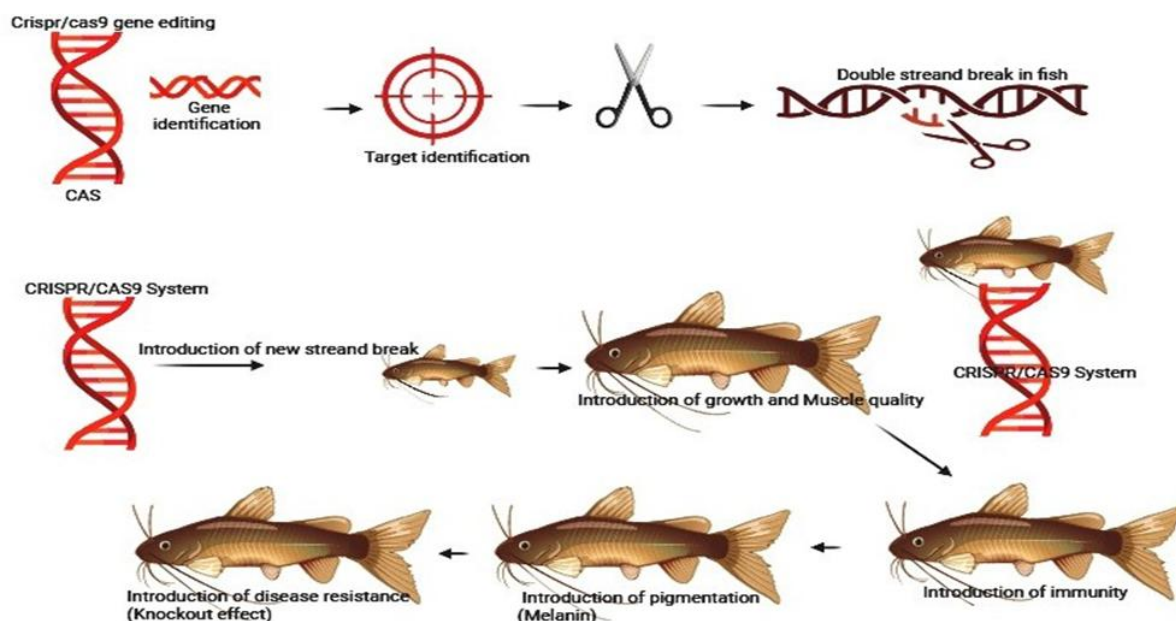
Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται από το CRISPR/Cas9 σε γονίδια νοκ-άουτ σε διαφορετικά



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

είδη ψαριών υποδεικνύεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Βήματα εφαρμογής του CRISPR/Cas9 στην υδατοκαλλιέργεια (Πρώτον, ένα συγκεκριμένο gRNA έχει σχεδιαστεί για να ταιριάζει με την αλληλουχία γονιδίων-στόχων. Στη συνέχεια, η πρωτεΐνη Cas9 συνδέεται με το DNA-στόχο, προκαλώντας θραύση διπλού κλώνου. Τέλος, το σπάσιμο επισκευάζεται) (Zhu et al., 2024)

3.2.4. Προσδιορισμός φύλου

Ο προσδιορισμός του φύλου στα ψάρια περιλαμβάνει γενετικούς, περιβαλλοντικούς και επιγενετικούς παράγοντες, καθιστώντας τον έναν πολύπλοκο αλλά ζωτικό τομέα μελέτης στην υδατοκαλλιέργεια. Το CRISPR/Cas9 έχει φωτίσει τους μηχανισμούς διαφοροποίησης των φύλων στοχεύοντας με ακρίβεια τα σχετικά γονίδια. Για παράδειγμα, η επεξεργασία του γονιδίου *amh* στην τιλάπια του Νείλου οδήγησε σε φαινοτυπικά θηλυκά από γενετικά αρσενικά, αποδεικνύοντας το ρόλο του γονιδίου στον προσδιορισμό του αρσενικού φύλου. Παρόμοιες μελέτες στο ψάρι-ζέβρα έχουν διερευνήσει γονίδια όπως το *dmrt1* και το *sox9a*, αποκαλύπτοντας την πολυγονιδιακή φύση του προσδιορισμού του φύλου σε αυτό το είδος. Επιπλέον, οι προβολές CRISPR / Cas9 σε όλο το γονιδίωμα έχουν εντοπίσει κύριους ρυθμιστές όπως το γονίδιο *sdY* στην ιριδίζουσα πέστροφα, προωθώντας την κατανόησή μας για τη διαφοροποίηση των φύλων.

3.2.5. Επιδράσεις της χρήσης του CRISPR/Cas9 στην επεξεργασία γονιδίων σε διαφορετικά είδη ψαριών

Το CRISPR/Cas9 αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως οι εξάρσεις ασθενειών, οι χαμηλοί ρυθμοί ανάπτυξης και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος στην υδατοκαλλιέργεια. Οι εφαρμογές του επεκτείνονται στον έλεγχο των χωροκατακτητικών ειδών, στη μηχανική μικροοργανισμών για περιβαλλοντική αποκατάσταση και στη δημιουργία γενετικά τροποποιημένων ψαριών για βιώσιμη παραγωγή. Η επεξεργασία γονιδιώματος προσφέρει λύσεις για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών των ψαριών, μετριάζοντας παράλληλα το οικολογικό αποτύπωμα της υδατοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, τα διαγονιδιακά ψάρια με βελτιωμένη αποδοτικότητα μετατροπής ζωοτροφών μειώνουν τη χρήση πόρων, υποστηρίζοντας φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές.



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Επιτρέποντας ακριβείς γενετικές τροποποιήσεις, η CRISPR/Cas9 έχει μεταμορφώσει την υδατοκαλλιέργεια, ανοίγοντας το δρόμο για βιώσιμες και αποτελεσματικές πρακτικές ιχθυοκαλλιέργειας. Οι συνεχείς εξελίξεις στις τεχνικές επεξεργασίας, τις ηθικές εκτιμήσεις και την περιβαλλοντική διαχείριση θα βελτιστοποιήσουν περαιτέρω την εφαρμογή του στον κλάδο. Ο πίνακας 2.1 παρέχει μια σύνοψη των χαρακτηριστικών που στοχεύουν συχνότερα στην επεξεργασία γονιδιώματος στην ιχθυοκαλλιέργεια (Blix et al., 2021).

Πίνακας 2.1. Επιδράσεις της CRISPR/Cas9 στις βιολογικές και περιβαλλοντικές πτυχές των ειδών ψαριών

Εφαρμόσιμα πεδία	Επιπτώσεις
Αντοχή στις ασθένειες	Χρησιμοποιείται για τη μείωση της ιογενούς λοίμωξης από τον ιό της αιμορραγικής σηψαιμίας (VHSV) των κυττάρων φυσικού εμβρύου hirame (HINAE) από τον ιό της ιογενούς αιμορραγικής σηψαιμίας (VHSV).
	Επιτρέπει την επεξεργασία γονιδίων σε είδη ψαριών όπως ο σολομός, η τιλάπια και οι γαρίδες για να αυξήσουν την αντοχή τους στις ασθένειες.
	Βοηθά στη διαγραφή του γονιδίου <i>JAM-A</i> στα κύτταρα κυπρίνου χόρτου, γεγονός που ενισχύει σημαντικά την αντίσταση στη μόλυνση από ρεοϊό κυπρίνου χόρτου (GCRV).
	Βοηθά στην ενίσχυση των κυτταρικών σειρών ψαριών για την απόκριση του ξενιστή και τη γενετική αντοχή έναντι μολυσματικών ασθενειών, χρησιμοποιώντας σολομό του Ατλαντικού και ιριδίζουσα πέστροφα ως πρότυπα συστήματα στην υδατοκαλλιέργεια.
Περιβαλλοντική προσαρμογή	Βοηθά στην επεξεργασία γονιδίων σε είδη ψαριών, όπως ο σολομός εκτροφής, για να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα
Βελτιωμένοι ρυθμοί ανάπτυξης και μύες	Αυξάνει την ανάπτυξη των μυών χτυπώντας τα γονίδια υποδοχέα μελανοκορτίνης (<i>mc4r</i>) και έχει δοκιμαστεί πειραματικά σε γατόψαρο καναλιού και ψάρια medaka.
	Βελτίωσε τους ρυθμούς ανάπτυξης και αύξησε τη μυϊκή μάζα του γατόψαρο καναλιού τροποποιώντας το γονίδιο μυοστατίνης στα έμβρυα γατόψαρο καναλιού.
	Βοηθά στην αύξηση της μυϊκής μάζας της αμβλύ τσιπούρας ρύγχους λόγω της διαταραχής του <i>mstna</i>

Η τεχνολογία επεξεργασίας γονιδίων CRISPR / Cas9 έχει φέρει επανάσταση στην υδατοκαλλιέργεια, επιτρέποντας ακριβείς γενετικές τροποποιήσεις για τη βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η αντοχή στις ασθένειες, η ανάπτυξη και η βιωσιμότητα. Αυτό το εργαλείο διευκολύνει επίσης τις γονιδιακές κινήσεις, αυξάνοντας το ποσοστό κληρονομικότητας των τροποποιημένων γονιδίων σε σχεδόν 100%, επιταχύνοντας την εξάπλωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών στους πληθυσμούς.

Οι Li et al., 2021 χρησιμοποίησαν το CRISPR/Cas9 για να δημιουργήσουν στείρους, αποκλειστικά αρσενικούς πληθυσμούς τιλάπιας του Νείλου, με αποτέλεσμα ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης και μειωμένους οικολογικούς κινδύνους από διαφυγόντα εκτρεφόμενα ψάρια. Ομοίως, οι Wargelius et al. ενίσχυσαν την ανθεκτικότητα στις ασθένειες του σολομού του Ατλαντικού τροποποιώντας γονίδια απαραίτητα για ιογενείς λοιμώξεις, αντιμετωπίζοντας σημαντικές απώλειες στην υδατοκαλλιέργεια που προκαλούνται από παθογόνα όπως το IPNV και το SAV.

Άλλες μελέτες έχουν αξιοποιήσει το CRISPR / Cas9 για την ενίσχυση της αντοχής στις ασθένειες σε κυπρίνους, τιλάπια και γατόψαρα, στοχεύοντας γονίδια που σχετίζονται με το ανοσοποιητικό σύστημα ή οδούς αναγνώρισης παθογόνων. Η επεξεργασία γονιδίων που σχετίζεται με την ανάπτυξη



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

έχει επίσης αποφέρει αξιοσημείωτες επιτυχίες, όπως νοκ άουτ μυοστατίνης σε κοινό κυπρίνο, γατόψαρο καναλιού και τσιπούρα, οδηγώντας σε αυξημένο μέγεθος σώματος και ρυθμούς ανάπτυξης.

Οι εφαρμογές της CRISPR/Cas9 εκτείνονται πέρα από τα χαρακτηριστικά παραγωγής, επιτρέποντας τη δημιουργία νέων φαινοτύπων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τιλάπια αλμπίνο Νείλου και τροποποιημένα στρείδια του Ειρηνικού με ενισχυμένη ανάπτυξη. Η ευελιξία της τεχνολογίας καλύπτει επίσης είδη όπως οι γαρίδες κορυφογραμμής, αποδεικνύοντας περαιτέρω το μετασχηματιστικό δυναμικό της στην υδατοκαλλιέργεια (πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2. Εφαρμογές του CRISPR/Cas9 σε διάφορα είδη ψαριών και οι επιπτώσεις τους (Zhu κ.ά., 2024)

Είδη ψαριών	Τεχνολογικές επιπτώσεις
Τιλάπια του Νείλου	Χρησιμοποιείται για την παραγωγή στειρών πληθυσμών τιλάπιας του Νείλου, μειώνοντας τον κίνδυνο περιβαλλοντικής βλάβης από τα ψάρια που διαφεύγουν.
Σολομός Ατλαντικού	Βοηθά στην επεξεργασία γονιδίων για τη δημιουργία ειδών που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε ιογενείς λοιμώξεις, π.χ. σολομός
Ψάρι Ζέβρα	Επιτρέπει στους επιστήμονες να μελετήσουν μεταλλάξεις και γενετικές παραλλαγές στο ψάρι-ζέβρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή ενσωμάτωση σύνθετων ετικετών σε έμβρυα ψαριού-ζέμπρα, επιτρέποντας την ακριβή επισήμανση και απεικόνιση κυτταρικών δομών ή πρωτεϊνών. Αυτό προσφέρει δυνατότητες για τη μελέτη της δυναμικής των πρωτεϊνών, της γονιδιακής έκφρασης και άλλων βιολογικών διεργασιών σε αυτόν τον οργανισμό-μοντέλο.
Ιριδίζουσα πέστροφα	Έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την έκφραση του γονιδίου igfbp-2b στην ιριδίζουσα πέστροφα, επηρεάζοντας την αύξηση και την ανάπτυξη, αλλά η επίδρασή του στη συνολική απόδοση και το ενδοκρινικό σύστημα παραμένει ασαφής.
Σολομός Ατλαντικού και ιριδίζουσα πέστροφα	Έχει χρησιμοποιηθεί για να στοχεύσει μοναδικά γονίδια που σχετίζονται με την ανάπτυξη και την ανοσία στον σολομό του Ατλαντικού, την ιριδίζουσα πέστροφα και τα κύτταρα σολομού coho.
Ιαπωνικό medaka	Έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ανάπτυξη των μυών και το σωματικό βάρος σε εκτρεφόμενα είδη ψαριών όπως η medaka. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να προσδιοριστεί ο αντίκτυπός της στην απόδοση παραγωγής και στην υγεία των ψαριών.
Χωματίδα	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαταράξει το γονίδιο μυοστατίνης στη χωματίδα της ελιάς, αυξάνοντας ενδεχομένως το σωματικό βάρος και τον μυϊκό ιστό, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να κατανοηθούν οι επιπτώσεις του στην αποδοτικότητα της παραγωγής και την υγεία των ψαριών
Γατόψαρο	Έχει χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση του γονιδίου μυοστατίνης στο γατόψαρο Channel για τη βελτίωση της μυϊκής ανάπτυξης και ποιότητας, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση των επιπτώσεών του.

4. Τεχνολογίες Κρυοσυντήρησης και Υποβοηθούμενης Αναπαραγωγής

4.1. Υδατοκαλλιέργεια και κρυοσυντήρηση

Η αναπαραγωγή ψαριών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και ακόμη και οι πιο έμπειροι χειριστές εκκολαπτηριών αντιμετωπίζουν συχνά μερικές ή πλήρεις αποτυχίες στη διαδικασία αναπαραγωγής. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποσότητα σπόρων, η επαγόμενη αναπαραγωγή



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

θεωρείται ευρέως ως αποτελεσματική μέθοδος. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει την ωρίμανση και την αναπαραγωγή των ψαριών υπό δυσμενείς συνθήκες, όπως ανεπαρκείς βροχοπτώσεις ή ακραία κλιματικά σενάρια. Ωστόσο, οι επαναλαμβανόμενες προσπάθειες αναπαραγωγής μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την υγεία των γεννητόρων εντός της περιορισμένης διάρκειας ζωής τους. Η αντικατάσταση των γεννητόρων είναι δύσκολη λόγω υλικοτεχνικών και φυσιολογικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη μεταφορά τους. Κατά συνέπεια, η μεταφορά γαμετών έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση, προσφέροντας οφέλη παρόμοια με αυτά που παρατηρούνται στην κτηνοτροφία.

Η ενσωμάτωση βιοτεχνολογικών εργαλείων στα προγράμματα αναπαραγωγής ψαριών είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση συνεπούς και βιώσιμης παραγωγής σπόρων. Η κρυοσυντήρηση αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την παραγωγή σπόρων υψηλής ποιότητας και γενετικά ανώτερων ποικιλιών ψαριών. Αναγνωρίζοντας τις δυνατότητές της, ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) έχει προσδιορίσει την κρυοσυντήρηση ως κρίσιμη στρατηγική για τη διατήρηση των γενετικών πόρων των ψαριών (Betsy et al., 2022).

Η κρυοσυντήρηση αναφέρεται στη διατήρηση βιολογικών δειγμάτων σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, αναστέλλοντας αποτελεσματικά τις μεταβολικές δραστηριότητες και διατηρώντας τη δομική και λειτουργική ακεραιότητα για αόριστο χρονικό διάστημα. Αυτή η τεχνολογία έχει γίνει ακρογωνιαίος λίθος της αναπαραγωγικής βιολογίας, προσφέροντας κρίσιμα οφέλη για τις βιομηχανίες κτηνοτροφίας και υδατοκαλλιέργειας. Διατηρώντας τις θερμοκρασίες κάτω από -130°C , οι μεταβολικές δραστηριότητες σταματούν εντελώς, επιτρέποντας σε βιολογικά δείγματα, όπως κύτταρα, ιστούς, ακόμη και ολόκληρους οργανισμούς, να παραμείνουν βιώσιμα μετά την απόψυξη. Η κρυοσυντήρηση έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διατήρηση πολύτιμου γενετικού υλικού, την ενίσχυση των προγραμμάτων αναπαραγωγής και την υποστήριξη των προσπαθειών διατήρησης της βιοποικιλότητας (Fletcher & Rise, 2012).

4.2. Βασικές Αρχές Κυτταρικής Κρυοσυντήρησης

4.2.1. Μηχανισμοί διατήρησης

Η κρυοσυντήρηση επιτρέπει τη διατήρηση των γαμετών για παρατεταμένες περιόδους, που συχνά εκτείνονται σε αρκετά χρόνια, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η γονιμοποιητική τους ικανότητα. Με τη μείωση της θερμοκρασίας σε περίπου -196°C , όλες οι βιολογικές και βιοχημικές δραστηριότητες σταματούν, αποτρέποντας τις διαδικασίες που οδηγούν σε κυτταρικό θάνατο και υποβάθμιση του DNA. Η τεχνική αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της υδατοκαλλιέργειας και της διατήρησης της βιοποικιλότητας.

Ωστόσο, ο σχηματισμός πάγου μέσα στα βιολογικά συστήματα παρουσιάζει μια σημαντική πρόκληση, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική βλάβη και οσμωτική ανισορροπία. Οι ελεγχόμενες διαδικασίες ψύξης διασφαλίζουν ότι ο πάγος σχηματίζεται εξωκυτταρικά, δημιουργώντας έτσι μια βαθμίδα συγκέντρωσης που διευκολύνει την εκροή νερού από τα κύτταρα. Αυτή η διαδικασία αποτρέπει τον θανατηφόρο σχηματισμό ενδοκυτταρικού πάγου. Οι πρόοδοι στους κρυοπροστατευτικούς παράγοντες (CPA) ήταν ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό αυτών των βλαβών, επιτρέποντας την επιτυχή διατήρηση διαφορετικών τύπων κυττάρων, ιστών και μικρών βιολογικών δομών. Βελτιώνοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών ψύξης, των συγκεντρώσεων CPA και των ειδικών χαρακτηριστικών των κυττάρων, οι ερευνητές έχουν βελτιώσει τα αποτελέσματα της κρυοσυντήρησης.



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

4.2.2. Κρυοπροστατευτικοί παράγοντες

Οι κρυοπροστατευτικοί παράγοντες διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στη μείωση του ενδοκυτταρικού σχηματισμού πάγου και στη διατήρηση της ακεραιότητας των πρωτεϊνών και των μεμβρανών κατά τη διάρκεια της κατάψυξης και της απόψυξης. Αυτοί οι παράγοντες εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: διαπερατοί και μη διαπερατοί. Διαπερατά CPA, όπως DMSO, γλυκερόλη και μεθανόλη, διεισδύουν στην κυτταρική μεμβράνη για να εξισορροπήσουν τις ενδοκυτταρικές και εξωκυτταρικές οσμωτικές πιέσεις. Τα μη διαπερατά CPA, συμπεριλαμβανομένων των σακχάρων και ορισμένων πρωτεϊνών, δρουν κυρίως εξωκυτταρικά για να τροποποιήσουν το σημείο πήξης του διαλύματος και να παρέχουν πρόσθετη προστασία. Παρά τα οφέλη τους, τα CPA πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, καθώς μπορούν να προκαλέσουν τοξικότητα, οσμωτικό στρες και χρωμοσωμικές ανωμαλίες εάν εφαρμοστούν ακατάλληλα. Η εξισορρόπηση των προστατευτικών επιδράσεων και των πιθανών δυσμενών αποτελεσμάτων είναι ένας κρίσιμος τομέας της συνεχιζόμενης έρευνας.

4.2.3. Πρωτόκολλα ψύξης και απόψυξης

Η επιτυχία της κρυοσυντήρησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ακριβή έλεγχο των πρωτοκόλλων ψύξης και απόψυξης. Οι ρυθμοί ελεγχόμενης κατάψυξης, που συνήθως κυμαίνονται από $-40^{\circ}\text{C} / \text{min}$ έως βραδύτερους ρυθμούς, είναι απαραίτητοι για την ελαχιστοποίηση του σχηματισμού κρυστάλλων πάγου. Εξειδικευμένοι βιοκαταψύκτες και μέθοδοι ατμών αζώτου χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίτευξη αυτών των ελεγχόμενων συνθηκών. Αντίθετα, η απόψυξη πρέπει να είναι ταχεία για να αποφευχθεί η ανακρυστάλλωση του πάγου, η οποία μπορεί να βλάψει σοβαρά τις κυτταρικές δομές. Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των προγραμματιζόμενων συσκευών κατάψυξης και των προηγμένων τεχνικών απόψυξης, στοχεύουν στην τυποποίηση και βελτιστοποίηση αυτών των διαδικασιών για διάφορα βιολογικά υλικά, βελτιώνοντας έτσι τα ποσοστά επιβίωσης και τη λειτουργική ανάκτηση (Fletcher & Rise, 2012).

4.3. Κρυοσυντήρηση γαμετών

4.3.1. Κρυοσυντήρηση σπέρματος

Η κρυοσυντήρηση σπέρματος αποτελεί μία από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές της κρυοβιολογίας, με καθιερωμένα πρωτόκολλα στην κτηνοτροφία και επέκταση των εφαρμογών στην υδατοκαλλιέργεια. Ωστόσο, το σπέρμα ψαριών παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από το σπέρμα των θηλαστικών, απαιτώντας μοναδικές προσεγγίσεις. Βασικά χαρακτηριστικά των σπερματοζωαρίων ψαριών περιλαμβάνουν την ακινησία τους στο σπερματικό πλάσμα, την ενεργοποίηση της κινητικότητας κατά την έκθεση σε ενεργοποιητικά διαλύματα, την υψηλή ευαισθησία στις οσμωτικές αλλαγές και τη σχετικά χαμηλή παραγωγή ATP. Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά υπογραμμίζουν την ανάγκη για προσαρμοσμένες στρατηγικές κρυοσυντήρησης για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας και της λειτουργικότητας κατά την απόψυξη.

Η ανάπτυξη αποτελεσματικών πρωτοκόλλων κρυοσυντήρησης σπέρματος ψαριών περιλαμβάνει διάφορα κρίσιμα βήματα:

Συλλογή σπέρματος: Η λήψη σπέρματος υψηλής ποιότητας απαλλαγμένου από μολυσματικούς παράγοντες είναι απαραίτητη. Τεχνικές όπως το κοιλιακό μασάζ, η αναρρόφηση ή η άμεση εξαγωγή από τους όρχεις χρησιμοποιούνται συνήθως, ανάλογα με το είδος. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή μόλυνσης με ουσίες όπως τα ούρα, τα οποία μπορούν να ενεργοποιήσουν πρόωρα την κινητικότητα.

Ανάλυση ποιότητας: Η αξιολόγηση της ποιότητας του σπέρματος είναι ζωτικής σημασίας για την



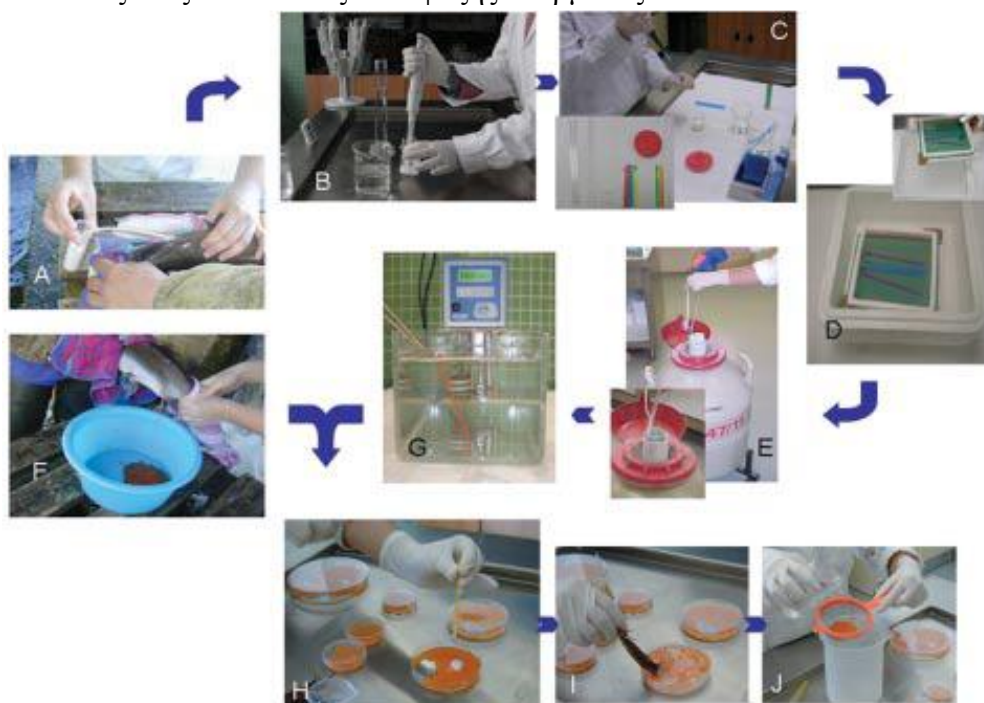
Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

επιλογή δειγμάτων κατάλληλων για κατάψυξη. Παράμετροι όπως η κινητικότητα, η βιωσιμότητα, το pH και η ωσμωτικότητα αξιολογούνται, συχνά χρησιμοποιώντας προηγμένα μηχανογραφικά συστήματα για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια.

Σύνθεση επέκτασης: Τα αραιωτικά είναι ρυθμιστικά διαλύματα που έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν την πρόωρη ενεργοποίηση της κινητικότητας και να παρέχουν ένα βέλτιστο περιβάλλον για κατάψυξη. Τα κοινά συστατικά περιλαμβάνουν γλυκόζη, κρόκο αυγού, αντιοξειδωτικά και CPA όπως DMSO ή γλυκερόλη. Η επιλογή της επέκτασης ποικίλλει ανάλογα με το είδος και τις ειδικές απαιτήσεις.

Κατάψυξη και απόψυξη: Το σπέρμα συνήθως φορτώνεται σε γαλλικά καλαμάκια ή κρυοβιάλ και καταψύχεται με ελεγχόμενους ρυθμούς πριν αποθηκευτεί σε υγρό άζωτο (-196 ° C). Η απόψυξη πρέπει να διεξάγεται ταχέως σε υδατόλουτρο ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη βιωσιμότητα. Το σχήμα 2.6 απεικονίζει τις διαδικασίες κατάψυξης σπέρματος



Σχήμα 2.6. Διαδικασία κατάψυξης σπέρματος: (A) εξαγωγή σπέρματος πέστροφας με *canulation*, (B) αραιώση σε κρυοπροστατευτικό αραιωτικό, (Γ) φόρτωση σε γαλλικά καλαμάκια 0,5 cc (ένθετο με διαφορετικά καλαμάκια, κρυοβιάλ και σκόνη PVA για σφράγιση άχυρου), (D) κατάψυξη πάνω από πλωτή συσκευή σε κουτί φελιζόλ που περιέχει N₂, (E) αποθήκευση σε δεξαμενή N₂, (F) θηλυκή απογύμνωση, (G) απόψυξη σπέρματος σε υδατόλουτρο, και (H–J) γονιμοποίηση (Fletcher & Rise, 2012)

4.3.2. Κρυοσυντήρηση ωαρίων

Σε αντίθεση με τα σπερματοζωάρια, τα ωάρια παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις για κρυοσυντήρηση. Το μεγάλο τους μέγεθος, η πολύπλοκη δομή τους και η περιορισμένη διαπερατότητα στα CPA τα καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητα σε κρυοβλαβές. Ζητήματα όπως η ευαισθησία στην ψύξη, ο ενδοκυτταρικός σχηματισμός πάγου και η τοξικότητα CPA είναι ιδιαίτερα έντονα. Επιπλέον, η παρουσία πολλαπλών στρωμάτων μεμβράνης και υψηλής περιεκτικότητας σε λιπίδια περιπλέκει περαιτέρω τη διαδικασία συντήρησης.



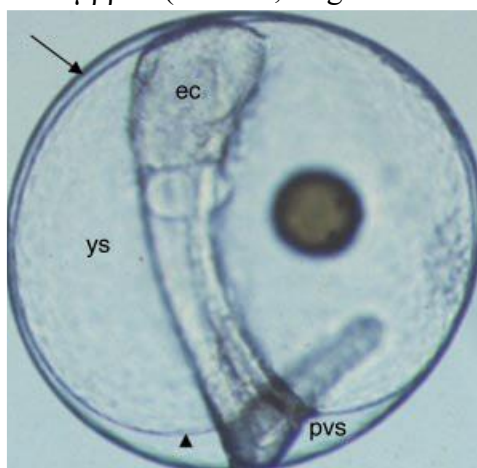
Ο ψηφιακός μπλε φορέας για ένα μέλλον μετά τον άνθρακα - Καινοτομίες προγράμματος σπουδών στην υδατοκαλλιέργεια [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στη διατήρηση των ωαρίων σε πρώιμα αναπτυξιακά στάδια, όπου η δομική τους απλότητα μπορεί να μειώσει την ευαισθησία σε κρυοβλαβές. Οι στρατηγικές περιλαμβάνουν σταδιακή αφαίρεση CPA για την ελαχιστοποίηση της τοξικότητας, μελέτες σχετικά με την αντίσταση στην ψύξη και την εφαρμογή τεχνικών υαλοποίησης. Η υαλοποίηση, η οποία περιλαμβάνει εξαιρετικά γρήγορη κατάψυξη με υψηλές συγκεντρώσεις CPA, προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση εξαλείφοντας τον σχηματισμό κρυστάλλων πάγου. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής CPA και την ελαχιστοποίηση της τοξικότητας.

4.4. Κρυοσυντήρηση εμβρύων

Η κρυοσυντήρηση εμβρύων ψαριών, η οποία αποσκοπεί στη διατήρηση τόσο του μητρικού όσο και του πατρικού γενετικού υλικού, έχει σημαντικές δυνατότητες ενίσχυσης της αναπαραγωγικής διαχείρισης της υδατοκαλλιέργειας. Παρά την υπόσχεσή της, η επιτυχής κρυοσυντήρηση εμβρύων ψαριών παραμένει μια πρόκληση λόγω της βιολογικής πολυπλοκότητας των εμβρύων, όπως το μεγάλο τους μέγεθος, η πολυδιαμερισματική δομή τους και η περιορισμένη διαπερατότητα σε κρυοπροστατευτικούς παράγοντες (CPAs). Αυτοί οι παράγοντες, σε συνδυασμό με την παρουσία φραγμών όπως η συγκυτιακή στιβάδα του κρόκου (YSL), εμποδίζουν την αποτελεσματική κατανομή των CPAs και του νερού σε όλο το έμβρυο (Εικ. 2.7, Hagedorn et al., 1997).



Σχήμα 2.7. Καλκάνι εμβρύου στο στάδιο του ουραίου οφθαλμού που δείχνει τους διαφορετικούς φακέλους και διαμερίσματα: χόριο (βέλος), συγκυτιακό στρώμα κρόκου (αιχμή βέλους), σάκος κρόκου (ys), χώρος περιβιτελίνης (pvs) και διαμέρισμα εμβρύου (ec) (Hagedorn et al., 1997)

Ένα σημαντικό εμπόδιο είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στα έμβρυα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό πάγου και κυτταρική βλάβη κατά τη διάρκεια της κατάψυξης και της απόψυξης. Τα έμβρυα πρώιμου σταδίου, τα οποία θεωρητικά προσφέρουν απλούστερες δομικές ιδιότητες για συντήρηση, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ψύξη και την τοξικότητα CPA, περιπλέκοντας περαιτέρω τις προσπάθειες κρυοσυντήρησης.

Μελέτες σχετικά με την ευαισθησία ψύξης σε έμβρυα ψαριών έχουν δείξει ότι τα πρώιμα αναπτυξιακά στάδια είναι πιο ευάλωτα σε χαμηλές θερμοκρασίες από ό, τι τα μεταγενέστερα στάδια. Οι στρατηγικές για τον μετριασμό των τραυματισμών ψύξης περιλαμβάνουν την τροποποίηση της δομής του εμβρύου και τη χρήση προστατευτικών ουσιών όπως οι αντιψυκτικές πρωτεΐνες (AFPs).



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Αυτές οι προσεγγίσεις έχουν δείξει δυνατότητες ενίσχυσης της αντοχής σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά δεν έχουν ακόμη επιτύχει σταθερή επιτυχία.

Η χρήση της υαλοποίησης, μιας τεχνικής που εξαλείφει το σχηματισμό πάγου μέσω εξαιρετικά γρήγορης κατάψυξης, έχει προταθεί ως ένας τρόπος για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις. Ωστόσο, η υαλοποίηση απαιτεί υψηλές συγκεντρώσεις CPAs, οι οποίες μπορεί να είναι τοξικές και δύσκολο να κατανεμηθούν ομοιόμορφα μέσα στο έμβρυο λόγω της περιορισμένης διαπερατότητάς του. Διάφορες πειραματικές τεχνικές, όπως η αύξηση της διαπερατότητας των εμβρύων και η βελτίωση των συστημάτων παράδοσης CPA, διερευνώνται για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών.

Οι πρόσφατες εξελίξεις περιλαμβάνουν μεθόδους για την παράκαμψη εμποδίων όπως το YSL και τη βελτίωση της διείσδυσης CPA. Τεχνικές όπως η μικροέγχυση CPAs ή η γενετική μηχανική για την ενίσχυση της διαπερατότητας του εμβρύου έχουν δείξει πολλά υποσχόμενες. Επιπλέον, η χρήση φυσικών αντιψυκτικών πρωτεϊνών έχει δείξει δυνατότητες στη μείωση του σχηματισμού κρυστάλλων πάγου και στην άμβλυση των βλαβών που προκαλούνται από το πάγωμα. Αν και αυτές οι μέθοδοι βρίσκονται ακόμη σε πειραματικά στάδια, προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για το μέλλον της κρυοσυντήρησης εμβρύων.

Η αντιμετώπιση των προκλήσεων της κρυοσυντήρησης εμβρύων ψαριών θα απαιτήσει διεπιστημονική συνεργασία και τεχνολογική καινοτομία. Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στην ενίσχυση της κρυοπροστασίας σε κυτταρικό επίπεδο και στη βελτίωση των τεχνικών χορήγησης CPA. Πολλά υποσχόμενες κατευθύνσεις περιλαμβάνουν τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών λείζερ για τη δημιουργία προσωρινών πόρων στα έμβρυα και την ανάπτυξη γενετικά τροποποιημένων στελεχών με αυξημένη αντοχή σε βλάβες κατάψυξης.

Με τη συνέχιση της έρευνας, η κρυοσυντήρηση εμβρύων ψαριών θα μπορούσε να αποτελέσει αξιόπιστο εργαλείο για την υδατοκαλλιέργεια, υποστηρίζοντας τη διατήρηση των γενετικών πόρων και προωθώντας βιώσιμες πρακτικές στην ιχθυοκαλλιέργεια.

4.5. Κρυοσυντήρηση εμβρύων

Η τεχνολογία κρυοσυντήρησης έχει αναπτυχθεί για πολλά είδη ψαριών (Betsy et al., 2022):

- Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση του milt του καλύτερου γεννήτορα ηλικιακής ομάδας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανά πάσα στιγμή στο μέλλον.
- Μπορεί επίσης να εξαλείψει το πρόβλημα της ενδογαμίας, καθώς τα κρυοσυντηρημένα σπερματοζωάρια μπορούν εύκολα να ανταλλάγουν μεταξύ των εκκολαπτηρίων.
- Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία, τα σπερματοζωάρια μπορούν να διατεθούν οποιαδήποτε εποχή του χρόνου.
- Καθιστά δυνατή την αναπαραγωγή εκτός εποχής.
- Συγχρονίζει τη διαθεσιμότητα γαμετών και των δύο φύλων οδηγώντας στην οικονομία του σπέρματος.
- Απλοποιεί τη διαχείριση των γεννητόρων στις εκμεταλλεύσεις.
- Βοηθά στην παραγωγή βιώσιμων και ισχυρών απογόνων με υβριδισμό εντός του είδους.
- Ξεπερνά τις δυσκολίες που προκύπτουν λόγω της σύντομης χρονικής βιωσιμότητας των γαμετών.
- Επιτρέπει τη γενετική διατήρηση των επιθυμητών γραμμών.
- Επιτρέπει τη διασταύρωση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του έτους.



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

- Βοηθά στην αποθήκευση γενετικού πλάσματος για προγράμματα γενετικής επιλογής ή διατήρησης ειδών.
- Τα κρυοσυντηρημένα σπερματοζωάρια μπορούν να βοηθήσουν στα προγράμματα υβριδισμού και στην έρευνα γενετικής μηχανικής στα ψάρια.
- Οδηγεί σε πολλές άλλες οδούς, όπως η κρυοαποθήκευση βιώσιμων γαμετών, όπως στην περίπτωση της ζωικής παραγωγής και της ανάπτυξης τράπεζας γονιδίων και της γενετικής τροποποίησης στα ψάρια.

Η κρυοσυντήρηση αντιπροσωπεύει ένα μετασχηματιστικό εργαλείο στη βιοτεχνολογία υδατοκαλλιέργειας, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για τη γενετική διατήρηση, τα προγράμματα αναπαραγωγής και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Ενώ οι προκλήσεις παραμένουν, ιδιαίτερα στη διατήρηση εμβρύων και ωαρίων, οι συνεχείς εξελίξεις στις κρυοπροστατευτικές μεθόδους, τα γενετικά εργαλεία και τη διεπιστημονική έρευνα υπόσχονται να ξεπεράσουν αυτά τα εμπόδια. Οι μελλοντικές εξελίξεις πιθανότατα θα επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα της κρυοσυντήρησης, διασφαλίζοντας την ευρύτερη εφαρμογή της στην υδατοκαλλιέργεια και πέραν αυτής. Μέσω της συνεχούς καινοτομίας, η κρυοσυντήρηση είναι έτοιμη να διαδραματίσει αναπόσπαστο ρόλο στην υποστήριξη της βιώσιμης ανάπτυξης της υδατοκαλλιέργειας και της διατήρησης της υδρόβιας βιοποικιλότητας (Fletcher & Rise, 2012).

5. Δεοντολογικά, περιβαλλοντικά και ρυθμιστικά ζητήματα στη βιοτεχνολογία υδατοκαλλιέργειας

5.1. Ηθικές ανησυχίες στη βιοτεχνολογία υδατοκαλλιέργειας

5.1.1. Καλή μεταχείριση των ζώων στη γενετική τροποποίηση

Οι ηθικές επιπτώσεις της γενετικής τροποποίησης στην υδατοκαλλιέργεια είναι βαθιές, ιδίως όσον αφορά την καλή μεταχείριση των ζώων. Οι γενετικές παρεμβάσεις, όπως η διαγένεση και η επεξεργασία γονιδίων, συχνά στοχεύουν στην ενίσχυση των χαρακτηριστικών παραγωγής όπως οι ρυθμοί ανάπτυξης, η αντοχή στις ασθένειες ή η περιβαλλοντική ανοχή. Ωστόσο, αυτές οι τροποποιήσεις μπορούν ακούσια να προκαλέσουν φυσιολογικό στρες ή επιπλοκές στην υγεία. Για παράδειγμα, η επιταχυνόμενη ανάπτυξη των διαγονιδιακών ψαριών μπορεί να οδηγήσει σε σκελετικές παραμορφώσεις, μειωμένη ανοσολογική λειτουργία ή αλλοιωμένους μεταβολικούς ρυθμούς. Οι επικριτές υποστηρίζουν ότι η προτεραιότητα της παραγωγικότητας έναντι της ευημερίας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ηθική μεταχείριση αυτών των οργανισμών, εγείροντας ερωτήματα σχετικά με την ισορροπία μεταξύ καινοτομίας και ανθρωπιστικών πρακτικών.

Ο περιορισμένος χαρακτήρας των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας ενισχύει περαιτέρω αυτές τις ανησυχίες. Τα ψάρια που εκτρέφονται σε τέτοια περιβάλλοντα συχνά υποβάλλονται σε υψηλή πυκνότητα εκτροφής, οδηγώντας σε άγχος, ευαισθησία σε ασθένειες και αλλαγές συμπεριφοράς. Οι ηθικοί προβληματισμοί επεκτείνονται στο κατά πόσον τα γενετικά τροποποιημένα ψάρια είναι περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλα για να ευδοκιμήσουν σε τέτοιες συνθήκες σε σύγκριση με τους άγριους ομολόγους τους. Η ανάπτυξη μετρήσεων καλής μεταχείρισης ειδικά προσαρμοσμένων για γενετικά τροποποιημένα υδρόβια είδη είναι ουσιαστικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι η ποιότητα ζωής τους δεν διακυβεύεται αδικαιολόγητα.



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

5.1.2. Οικολογική ακεραιότητα και βιοποικιλότητα

Πέρα από την ατομική ευημερία, οι ηθικές ανησυχίες περιλαμβάνουν τις ευρύτερες οικολογικές επιπτώσεις των βιοτεχνολογικών παρεμβάσεων. Η εισαγωγή γενετικώς τροποποιημένων ή επιλεκτικά εκτρεφόμενων ειδών σε συστήματα υδατοκαλλιέργειας ή φυσικούς οικοτόπους ενέχει κινδύνους για την οικολογική ακεραιότητα. Για παράδειγμα, τα διαγονιδιακά ψάρια με αυξημένους ρυθμούς ανάπτυξης μπορεί να ανταγωνίζονται τα αυτόχθονα είδη για πόρους, διαταράσσοντας τα τοπικά οικοσυστήματα και ενδεχομένως οδηγώντας στη μείωση ή την εξαφάνιση των άγριων πληθυσμών. Οι ανησυχίες αυτές υπογραμμίζουν την ηθική ευθύνη να διασφαλιστεί ότι οι εφαρμογές της βιοτεχνολογίας δεν υπονομεύουν τη βιοποικιλότητα και την ανθεκτικότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων.

Η δεοντολογική συζήτηση αγγίζει επίσης την ανθρώπινη διαχείριση της βιοποικιλότητας. Ενώ η βιοτεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στις προσπάθειες διατήρησης, όπως μέσω της κρυοσυντήρησης του γενετικού υλικού των απειλούμενων ειδών, εγείρει επίσης ερωτήματα σχετικά με το δικαίωμα της ανθρωπότητας να τροποποιεί τους γενετικούς κώδικες για οικονομικούς ή οικολογικούς σκοπούς. Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της μόχλευσης της βιοτεχνολογίας για θετικά αποτελέσματα και της διατήρησης των φυσικών εξελικτικών διαδικασιών των υδρόβιων ειδών παραμένει βασική ηθική πρόκληση.

5.2. Κανονιστικά Πλαίσια

5.2.1. Παγκόσμια πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές

Η διακυβέρνηση των βιοτεχνολογικών εφαρμογών στην υδατοκαλλιέργεια είναι ένας σύνθετος και εξελισσόμενος τομέας. Διεθνείς οργανισμοί όπως ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) και η Σύμβαση για τη Βιολογική Ποικιλότητα (CBD) έχουν θεσπίσει πλαίσια για την καθοδήγηση της ασφαλούς και ηθικής χρήσης της βιοτεχνολογίας. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές τονίζουν την αρχή της προφύλαξης, υποστηρίζοντας διεξοδικές αξιολογήσεις κινδύνου και παρακολούθηση πριν από την έγκριση και την απελευθέρωση γενετικά τροποποιημένων οργανισμών (ΓΤΟ) στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας.

Μια βασική πτυχή των παγκόσμιων προτύπων είναι η εναρμόνιση των κανονισμών μεταξύ των χωρών για τη διασφάλιση της συνέπειας στα μέτρα ασφαλείας και την προστασία του περιβάλλοντος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένης της διασυνοριακής φύσης των υδάτινων οικοσυστημάτων και της πιθανότητας οι δραπέτες να επηρεάσουν τα ύδατα των γειτονικών εθνών. Η συνεργασία μεταξύ των χωρών μέσω συνθηκών και συμφωνιών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην καθιέρωση ομοιόμορφων πρακτικών και στον μετριασμό των κινδύνων

5.2.2. Εθνικές ρυθμιστικές προσεγγίσεις

Σε εθνικό επίπεδο, τα ρυθμιστικά πλαίσια ποικίλλουν ευρέως, αντανakλώντας διαφορετικές προτεραιότητες, τεχνολογικές ικανότητες και κοινωνικές στάσεις απέναντι στη βιοτεχνολογία. Ορισμένες χώρες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς, διαθέτουν ισχυρά συστήματα για την αξιολόγηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των γενετικά τροποποιημένων οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων εκτεταμένων διαδικασιών αναθεώρησης που περιλαμβάνουν επιστημονικές, περιβαλλοντικές και αξιολογήσεις δημόσιας υγείας. Αντίθετα, άλλες περιφέρειες ενδέχεται να μην διαθέτουν ολοκληρωμένες ρυθμιστικές δομές, γεγονός που οδηγεί σε κενά στην εποπτεία και δυνητικούς κινδύνους.

Οι ρυθμιστικές προσεγγίσεις συχνά περιλαμβάνουν διαδικασίες πολλαπλών σταδίων, ξεκινώντας με εργαστηριακές δοκιμές και προχωρώντας μέσω ελεγχόμενων δοκιμών πεδίου πριν από την εφαρμογή



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

πλήρους κλίμακας. Οι διαδικασίες αυτές αποσκοπούν στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των νέων βιοτεχνολογιών. Η δημόσια διαβούλευση και η διαφάνεια αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως κρίσιμες συνιστώσες των ρυθμιστικών πλαισίων, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη και διασφαλίζοντας ότι οι αποφάσεις αντικατοπτρίζουν τις κοινωνικές αξίες.

5.2.3. Αξιολογήσεις ασφάλειας και διαδικασίες έγκρισης

Οι αξιολογήσεις ασφάλειας είναι κεντρικής σημασίας για τα κανονιστικά πλαίσια, παρέχοντας μια επιστημονική βάση για την αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων των εφαρμογών της βιοτεχνολογίας. Οι αξιολογήσεις αυτές αφορούν συνήθως διάφορους βασικούς τομείς:

Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι: Αξιολόγηση της πιθανότητας διαφυγής και των πιθανών οικολογικών επιπτώσεων των ΓΤΟ, συμπεριλαμβανομένου του ανταγωνισμού με τα αυτόχθονα είδη, του υβριδισμού και της τροποποίησης των οικοτόπων.

Κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία: Διασφάλιση ότι τα γενετικά τροποποιημένα ψάρια που προορίζονται για κατανάλωση είναι απαλλαγμένα από αλλεργιογόνα, τοξίνες ή ακούσιες γενετικές επιδράσεις που θα μπορούσαν να βλάψουν τους καταναλωτές.

Παρακολούθηση οικοσυστημάτων: Εφαρμογή προγραμμάτων παρακολούθησης μετά την έγκριση για τον εντοπισμό και τον μετριασμό απρόβλεπτων επιπτώσεων, διασφαλίζοντας μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα.

Οι διαδικασίες έγκρισης συχνά περιλαμβάνουν συντονισμό μεταξύ πολλών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των αρχών περιβάλλοντος, γεωργίας και δημόσιας υγείας. Οι αυστηρές επιστημονικές αξιολογήσεις, σε συνδυασμό με τη συμβολή του κοινού, αποσκοπούν στην εξισορρόπηση της καινοτομίας με ζητήματα ασφάλειας και δεοντολογίας.

5.3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιοτεχνολογίας υδατοκαλλιέργειας

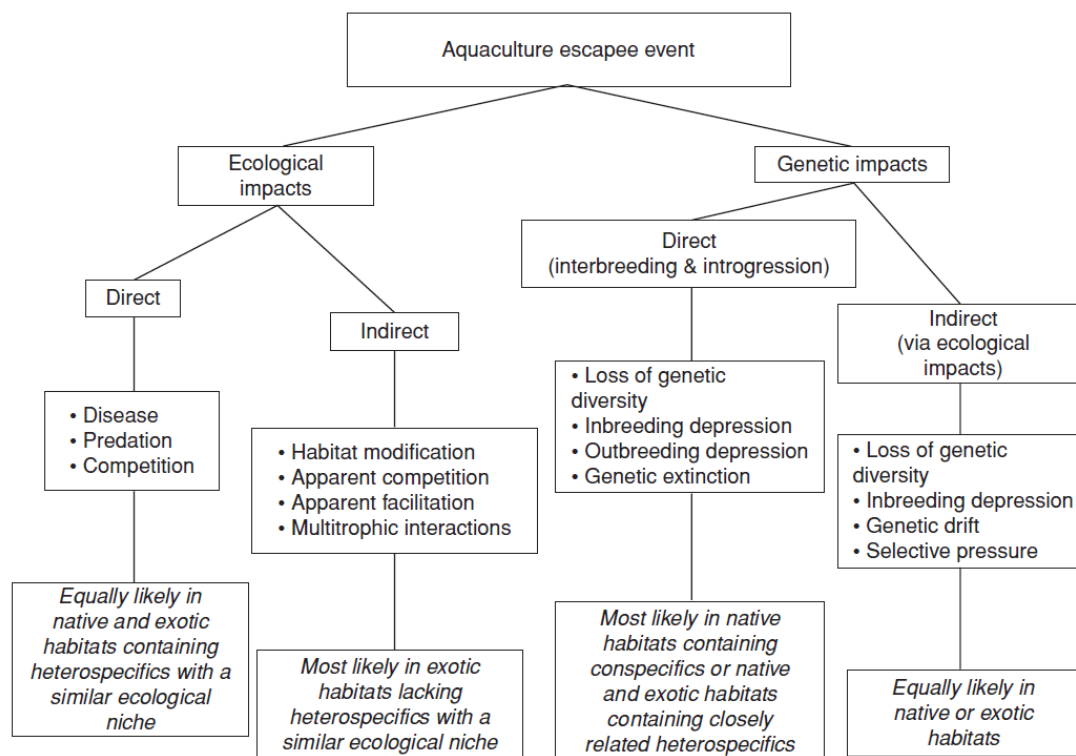
5.3.1. Δυναμική οικοσυστημάτων και γενετική ρύπανση

Ένας από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους της βιοτεχνολογίας υδατοκαλλιέργειας είναι η γενετική ρύπανση, όπου γονίδια από γενετικά τροποποιημένα ή επιλεκτικά εκτρεφόμενα είδη μεταφέρονται σε άγριους πληθυσμούς. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω της διασταύρωσης, οδηγώντας σε γενετική ομογενοποίηση και απώλεια τοπικά προσαρμοσμένων χαρακτηριστικών σε άγρια είδη. Οι μακροπρόθεσμες συνέπειες μιας τέτοιας γενετικής διείσδυσης περιλαμβάνουν μειωμένη ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές αλλαγές και μειωμένη βιοποικιλότητα.

Οι επιπτώσεις της επιλογής εξημέρωσης στα γενετικά και φαινοτυπικά χαρακτηριστικά των ζώων υδατοκαλλιέργειας οδηγούν σε διάφορες πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την απελευθέρωσή τους στη φύση. Το σχήμα 2.8 συνοψίζει τους μηχανισμούς που ευθύνονται για τέτοιες επιπτώσεις σε τέσσερις κατηγορίες: άμεσες οικολογικές επιπτώσεις, έμμεσες οικολογικές επιδράσεις, άμεσες γενετικές επιδράσεις και έμμεσες γενετικές επιδράσεις.



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



Σχήμα 2.8. Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δραπέτων υδατοκαλλιέργειας

Τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε συμβάντα διαφυγής, όπου τα εκτρεφόμενα ψάρια εισέρχονται σε φυσικά οικοσυστήματα. Αυτοί οι δραπέτες μπορούν να ανταγωνιστούν τους άγριους πληθυσμούς για πόρους, να εισάγουν ασθένειες και να διαταράξουν τη δυναμική του τροφικού ιστού. Ο μετριασμός αυτών των κινδύνων απαιτεί ισχυρές στρατηγικές περιορισμού, όπως φυσικούς φραγμούς, και ανάπτυξη στείρων γενετικά τροποποιημένων ψαριών για την πρόληψη της αναπαραγωγής στη φύση.

5.3.2. Αλληλεπιδράσεις με άγριους πληθυσμούς

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ εκτρεφόμενων και άγριων πληθυσμών εκτείνονται πέρα από τις γενετικές επιπτώσεις. Τα διαγονιδιακά ψάρια με ενισχυμένα χαρακτηριστικά, όπως ταχύτερη ανάπτυξη ή μεγαλύτερη αντοχή στις ασθένειες, μπορεί να έχουν οικολογικά πλεονεκτήματα έναντι των άγριων ομολόγων τους. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στις σχέσεις θηρευτή-θηράματος, αλλοιωμένη δυναμική ανταγωνισμού και αλλαγές στη χρήση των οικοτόπων. Η έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά και τους οικολογικούς ρόλους των γενετικά τροποποιημένων ψαριών είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη και τη διαχείριση αυτών των αλληλεπιδράσεων. Οι μακροπρόθεσμες οικολογικές μελέτες, σε συνδυασμό με την προγνωστική μοντελοποίηση, μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό πιθανών κινδύνων και να καθοδηγήσουν τις πρακτικές διαχείρισης.

5.3.3. Μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα

Η διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της βιοτεχνολογίας υδατοκαλλιέργειας απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις οικολογικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Αυτό περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση της καταστροφής των οικοτόπων, τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων και την προστασία των άγριων πληθυσμών. Η πρόοδος στη βιοτεχνολογία, όπως η ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον ζωοτροφών και η βελτίωση των



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, μπορεί να συμβάλει σε πιο βιώσιμες πρακτικές υδατοκαλλιέργειας.

Η παρακολούθηση και η προσαρμοστική διαχείριση αποτελούν κρίσιμες συνιστώσες της βιώσιμης υδατοκαλλιέργειας. Αξιολογώντας συνεχώς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των βιοτεχνολογικών παρεμβάσεων και προσαρμόζοντας ανάλογα τις πρακτικές, τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορούν να εξισορροπήσουν την παραγωγικότητα με την οικολογική ευθύνη

5.4. Εξισορρόπηση προόδου και ευθύνης

Η ενσωμάτωση της βιοτεχνολογίας στην υδατοκαλλιέργεια προσφέρει τεράστιες ευκαιρίες για την αντιμετώπιση παγκόσμιων προκλήσεων όπως η επισιτιστική ασφάλεια και η διατήρηση της βιοποικιλότητας. Ωστόσο, η πρόοδος αυτή πρέπει να συνοδεύεται από ισχυρή δέσμευση για δεοντολογικές αρχές, αυστηρή ρυθμιστική εποπτεία και προληπτική περιβαλλοντική διαχείριση. Με την προώθηση της συνεργασίας μεταξύ των επιστημόνων, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής, των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας και του κοινού, η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να εξελιχθεί με καινοτόμο και βιώσιμο τρόπο.

Οι δεοντολογικές, περιβαλλοντικές και κανονιστικές εκτιμήσεις δεν αποτελούν απλώς εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν, αλλά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της υπεύθυνης προόδου της βιοτεχνολογίας υδατοκαλλιέργειας. Μέσω προσεκτικού σχεδιασμού, διαφανούς λήψης αποφάσεων και συνεχούς έρευνας, ο τομέας μπορεί να αξιοποιήσει τις δυνατότητές του, διασφαλίζοντας παράλληλα την ευημερία των υδάτινων οικοσυστημάτων και των κοινοτήτων που εξαρτώνται από αυτά (Fletcher & Rise, 2012).

Περίληψη

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει διαταράξει σημαντικά τους κύκλους αναπαραγωγής, τους ρυθμούς ανάπτυξης και την επιβίωση των υδρόβιων ειδών. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες του νερού μεταβάλλουν τους χρόνους ωοτοκίας και τους μεταβολικούς ρυθμούς, οδηγώντας σε αναντιστοιχίες με τη διαθεσιμότητα τροφής και τις μη βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των προνυμφών. Είδη όπως ο μπακαλιάρος του Ατλαντικού και η πέρκα αναπαράγονται νωρίτερα, με αποτέλεσμα μειωμένα ποσοστά επιβίωσης για τους απογόνους τους. Επιπλέον, οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα οξυγόνου στο νερό, καταπονώντας τις προνύμφες και επηρεάζοντας τη νεανική ανάπτυξη. Ενώ ορισμένα είδη παρουσιάζουν γενετικές προσαρμογές για να αντιμετωπίσουν αυτές τις αλλαγές, οι ταχείες περιβαλλοντικές αλλαγές συχνά ξεπερνούν την ικανότητα προσαρμογής των πληθυσμών, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμες μειώσεις.

Η υδατοκαλλιέργεια έχει αγκαλιάσει τη βιοτεχνολογία για να μετριάσει αυτές τις προκλήσεις και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα στα εκτρεφόμενα είδη. Τα προγράμματα επιλεκτικής αναπαραγωγής επικεντρώνονται σε χαρακτηριστικά όπως η ανοχή στη θερμότητα, η αντοχή στις ασθένειες και η αποτελεσματικότητα της ανάπτυξης. Η γονιδιωματική επιλογή επιταχύνει αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιώντας γενετικούς δείκτες για τη διάδοση επιθυμητών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, ο σολομός του Ατλαντικού έχει εκτραφεί για να ανέχεται υψηλότερες θερμοκρασίες και υποξικές συνθήκες, ενώ γονιδιωματικά εργαλεία έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανθεκτικών στις ασθένειες στελεχών ιριδίζουσας πέστροφας και άλλων ειδών.

Η τεχνολογία CRISPR/Cas9 έχει αναδειχθεί ως ένα επαναστατικό εργαλείο στην υδατοκαλλιέργεια, επιτρέποντας ακριβείς και στοχευμένες τροποποιήσεις στα γονιδιώματα των ψαριών. Αυτή η



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

μέθοδος επιτρέπει την ενίσχυση βασικών χαρακτηριστικών όπως η ανάπτυξη, η ποιότητα των μυών, η αντοχή στις ασθένειες και η περιβαλλοντική προσαρμογή. Για παράδειγμα, οι γενετικές τροποποιήσεις σε είδη όπως η τιλάπια του Νείλου και το γατόψαρο του καναλιού έχουν οδηγήσει σε ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης και βελτιωμένη ανάπτυξη μυών στοχεύοντας το γονίδιο μυοστατίνης (*mstn*). Ομοίως, το CRISPR / Cas9 έχει χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της αντοχής στις ασθένειες στον σολομό του Ατλαντικού και τον κυπρίνο χόρτου με την επεξεργασία γονιδίων που σχετίζονται με το ανοσοποιητικό σύστημα και οδών αναγνώρισης παθογόνων.

Εκτός από τη βελτίωση των ατομικών χαρακτηριστικών, το CRISPR έχει εφαρμογές στον προσδιορισμό του φύλου και τη διαχείριση του πληθυσμού. Τεχνικές όπως η δημιουργία στειρών πληθυσμών μειώνουν τους οικολογικούς κινδύνους που συνδέονται με τα εκτρεφόμενα ψάρια που διαφεύγουν. Παρά τις εξελίξεις αυτές, η τεχνολογία δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Οι επιπτώσεις εκτός στόχου και οι ηθικές ανησυχίες σχετικά με την επεξεργασία γονιδιώματος, ιδίως όσον αφορά την καλή διαβίωση των ζώων και τους οικολογικούς κινδύνους, απαιτούν ισχυρή ρυθμιστική εποπτεία και περαιτέρω έρευνα.

Η κρυοσυντήρηση είναι μια άλλη βασική τεχνολογία, προσφέροντας λύσεις για τη διατήρηση των γενετικών πόρων και την αποτελεσματικότητα της αναπαραγωγής. Διατηρώντας γαμέτες και έμβρυα σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, αυτή η τεχνική υποστηρίζει προγράμματα διατήρησης και αναπαραγωγής της βιοποικιλότητας σε όλες τις εποχές και γεωγραφικές περιοχές. Ωστόσο, προκλήσεις όπως η ευαισθησία στην ψύξη και η κρυοπροστατευτική τοξικότητα, ειδικά στα ωάρια και τα έμβρυα, υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνεχή έρευνα για τη βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων και τη βελτίωση των ποσοστών επιτυχίας.

Η ενσωμάτωση της βιοτεχνολογίας στην υδατοκαλλιέργεια εγείρει βαθιά ηθικά και περιβαλλοντικά ζητήματα. Η δυνατότητα των γενετικά τροποποιημένων οργανισμών (ΓΤΟ) να διαφύγουν στα φυσικά οικοσυστήματα και να διασταυρωθούν με άγριους πληθυσμούς ενέχει κινδύνους για τη γενετική ακεραιότητα και τη βιοποικιλότητα. Τα ρυθμιστικά πλαίσια τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών, δίνοντας έμφαση στις εκτιμήσεις κινδύνου, την παρακολούθηση και τη συμμετοχή του κοινού. Οι ηθικοί προβληματισμοί επεκτείνονται στην καλή μεταχείριση των ζώων, ιδίως όσον αφορά τη διασφάλιση ότι οι βιοτεχνολογικές παρεμβάσεις δεν θέτουν σε κίνδυνο την υγεία και την καλή διαβίωση των εκτρεφόμενων ειδών.

Το μέλλον της υδατοκαλλιέργειας εξαρτάται από την εξισορρόπηση της τεχνολογικής προόδου με τη βιωσιμότητα. Καινοτομίες όπως η CRISPR/Cas9 και η γονιδιωματική επιλογή έχουν τεράστιες δυνατότητες ενίσχυσης της ανθεκτικότητας και της παραγωγικότητας. Ωστόσο, η διεπιστημονική συνεργασία, η ισχυρή διακυβέρνηση και η περιβαλλοντική διαχείριση είναι απαραίτητες για την ελαχιστοποίηση των οικολογικών επιπτώσεων και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας. Δίνοντας προτεραιότητα στις δεοντολογικές πρακτικές και τη βιωσιμότητα, η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην αντιμετώπιση των παγκόσμιων προκλήσεων επισιτιστικής ασφάλειας και στη διατήρηση της υδρόβιας βιοποικιλότητας.

Το κεφάλαιο αυτό υπογραμμίζει τον επείγοντα χαρακτήρα της αντιμετώπισης των αλληλένδετων προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής και της βιωσιμότητας της υδατοκαλλιέργειας μέσω καινοτόμων και υπεύθυνων βιοτεχνολογικών λύσεων. Αξιοποιώντας το δυναμικό αυτών των εξελίξεων, ο κλάδος της υδατοκαλλιέργειας μπορεί να συμβάλει στις παγκόσμιες προσπάθειες για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, την ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή και την επισιτιστική ασφάλεια.



Αναφορές

- Angilletta, M. J., et al. (2004). "Thermal Adaptation of Ectotherms." *Nature*.
- Chevin, L. M., et al. (2010). "Adaptation to Climate Change." *Ecology Letters*.
- Durant, J. M., et al. (2007). "Trophic Match-Mismatch and Climate Change." *Ecology*.
- Fischer, J. R., et al. (2014). "Evolutionary Responses of Aquatic Species to Climate Change." *Nature Climate Change*.
- Heath, M. R., et al. (2014). "Climate Change and Fish Growth." *Fish and Fisheries*.
- Jorgensen, C., et al. (2017). "Local Adaptation of Atlantic Cod to Thermal Variation." *Journal of Evolutionary Biology*.
- Lynch, M., et al. (2014). "Evolution in Changing Environments." *Trends in Ecology & Evolution*.
- O'Reilly, C. M., et al. (2008). "Impacts of Climate Change on Fish Populations." *Science*.
- Parnesan, C. (2006). "Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*.
- Pörtner, H. O., et al. (2014). "Oxygen Supply and Temperature in Aquatic Ecosystems." *Nature*.
- Tompkins, E. M., et al. (2017). "Effects of Warming on Fish Breeding Patterns." *Global Change Biology*.
- Walther, G. R., et al. (2002). "Ecological Responses to Recent Climate Change." *Nature*.
- Gjøsæ, H. M., et al. (2018). "Aquaculture breeding programs for climate resilience." *Aquaculture Reports*.
- Houston, R. D., et al. (2018). "Selective breeding for disease resistance in aquaculture species: challenges and progress." *Fisheries Research*.
- Huntingford, F. A., et al. (2020). "The potential of selective breeding for climate resilience in aquaculture species." *Aquaculture*.
- Liu, Y., et al. (2020). "Genomic selection for heat tolerance in rainbow trout: A practical approach." *Journal of Fish Biology*.
- Vázquez, R., et al. (2018). "Genomic selection in aquaculture for disease resistance." *Aquaculture International*.
- Yang, Z., Yu, Y., Tay, Y. X., & Yue, G. H. (2021). Genome editing and its applications in genetic improvement in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 00(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/raq.12591>
- Sankaran, G. B., & Mandal, A. (2024). Genetic improvements in aquaculture. *The Trout Journal of Atatürk University*, 2(1–2), 16–25. <https://doi.org/10.62425/tjau.1570599>
- Zhu, M., Sumana, S. L., Abdullateef, M. M., Falayi, O. C., Shui, Y., Zhang, C., Zhu, J., & Su, S. (2024). CRISPR/Cas9 technology for enhancing desirable traits of fish species in aquaculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9299. <https://doi.org/10.3390/ijms25179299>
- Blix, T. B., Dalmo, R. A., Wargelius, A., & Myhr, A. I. (2021). Genome editing on finfish: Current status and implications for sustainability. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2344–2363. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef])
- Li, M., Dai, S., Liu, X., Xiao, H., & Wang, D. (2021). A detailed procedure for CRISPR/Cas9-mediated gene editing in tilapia. *Journal of Hydrobiology*, 848, 3865–3881. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef])



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

Wargelius, A., Leininger, S., Skaftnesmo, K. O., Kleppe, L., Andersson, E., Taranger, G. L., Schulz, R. W., & Edvardsen, R. B. (2016). Dnd knockout ablates germ cells and demonstrates germ cell independent sex differentiation in Atlantic salmon. *Scientific Reports*, 6, 21284. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef]) [PubMed]

Betsy, C. J., C, S., & Sampath Kumar, J. S. (2022). Cryopreservation and its application in aquaculture. In *Cryopreservation and Its Application in Aquaculture*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99629>

Fletcher, G. L., & Rise, M. L. (Eds.). (2012). *Aquaculture biotechnology*. Chichester: Wiley-Blackwell.

Hagedorn, M., Hsu, E., Kleinhaus, F. W., & Wildt, D. E. (1997). New approaches for studying the permeability of fish embryos: Toward successful cryopreservation. *Cryobiology*, 34(4), 335–347.