



Funded by  
the European Union



The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

# **AKVAKULTURA ZA BUDUĆNOST OTPORNU NA KLIMATSKE PROMJENE**

2025

Akademija



Funded by  
the European Union



The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

## Akvakultura za budućnost otpornu na klimatske promjene

**Autori:** Vlasta BARTULOVIĆ, Anželika DAUTARTĖ, Ergün DEMIR, Tatjana DOBROSLAVIČ, Dimitris KLAUDATOS, Halyna KRUSIR, Maryna MARDAR, Olha SAHDIEIEVA, Muhittin ZENGİN, Alvydas ŽIBAS, Gražina ŽIBIENĖ

**Urednica:** Anželika DAUTARTĖ

### Recenzenti:

1. izv. prof. dr. sc. Midona DAPKIENĖ, Sveučilište Vytautas Magnus
2. izv. prof. dr. sc. Daiva ŠILEIKIENĖ, Sveučilište Vytautas Magnus

Ova publikacija razvijena je u sklopu Erasmus+ projekta "The Digital Blue Career for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture " [DiBluCa] (br. 2023-1-LT01-KA220-HED-000154247).

*Potpore Europske komisije u izradi ove publikacije ne predstavlja odobravanje sadržaja koji odražava isključivo stajališta autora i Komisija se ne može smatrati odgovornom za bilo kakvu uporabu informacija sadržanih u toj publikaciji.*

Sva prava pridržana. Nijedan dio ove publikacije ne smije se reproducirati, pohranjivati u sustavu za dohvaćanje ili prenositi u bilo kojem obliku ili na bilo koji način – elektronički, mehanički, fotokopiranjem, snimanjem ili na drugi način – bez prethodnog dopuštenja izdavača, osim kratkih citata koji se koriste za širenje.

## Predgovor

Suvremeni svijet prolazi kroz brzu transformaciju. Pokazatelji da klimatske promjene nisu daleka perspektiva, već sadašnja stvarnost, uključuju porast temperatura, ekstremne vremenske prilike, zakiseljavanje oceana i fluktuacije razine mora. Ovaj fenomen ima dalekosežne posljedice za sve aspekte društva, utječući na pojedince, ekosustave, poljoprivredne sustave i zajednice. Akvakultura, sastavni dio ribarstva, sektor je koji je posebno osjetljiv na te promjene. To je vitalni izvor proteina za rastuću globalnu populaciju i smatra se modelom za budućnost održive proizvodnje hrane.

Cilj ove publikacije je olakšati čitateljima razumijevanje posljedica klimatskih promjena na akvakulturu i naglasiti znanje i rješenja potrebna za osiguravanje otpornog, etičkog i održivog razvoja sektora. Ova veza označava konvergenciju znanstvenih, tehnoloških i praktičnih domena, naglašavajući iznimnu važnost ljudske prilagodljivosti, suradnje i sklonosti poticanju promjena.

Ovaj svezak istražuje ne samo posljedice promjena u okolišu – kao što su toplinski stres, izbijanje bolesti, učinkovitost hrane za životinje, genetska prilagodba i korištenje biotehnologija – već i sustave, metode i mjere politike koje mogu pomoći sektoru da napreduje. Teme obuhvaćaju prilagodbu recirkulacijskih sustava akvakulture (RAS), provedbu integrirane multitrofičke akvakulture (IMTA), upravljanje strategijama hranjenja u promjenjivim temperaturnim režimima i korištenje inovacija za ublažavanje učinaka zakiseljavanja oceana.

Ipak, ova publikacija se ne bavi isključivo sustavima i tehnologijama. Fokus ove studije je na ljudskim subjektima. Ovaj se tekst odnosi na studente koji su spremni odrediti plavu ekonomiju budućnosti. Sljedeći diskurs odnosi se na pedagoge koji imaju zadatak usaditi vrijednosti u svoje studente. Sljedeći diskurs odnosi se na nastojanja uzgajivača i istraživača u njihovoj potrazi za rješenjima na lokalnoj i globalnoj razini. To se odnosi na sve pojedince koji su zabrinuti za nasljeđe koje će biti ostavljeno za potomstvo.

Ova publikacija razvijena je u sklopu projekta pod nazivom "The Digital Blue Career for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture". Ova je inicijativa osmišljena kako bi potaknula dublje ispitivanje teme, promicala usvajanje održivih praksi i usadila osjećaj odgovornosti kod svih pojedinaca. U kontekstu klimatskih promjena, praksa akvakulture mora se razmatrati u smislu izazova i prilika.

izv. prof. dr. sc. Anželika Dautartė

Zavod za znanosti o okolišu i ekologiju

Fakultet šumarskih znanosti i ekologije, VMU Poljoprivredna akademija

## Kratice

**DHA** – dokozaheksaenska kiselina

**EPA** – eikozapentaenska kiselina

**FCR** – omjer pretvorbe hrane

**FER** – omjer učinkovitosti hrane

**GE** – Bruto energija

**Staklenički plinovi**

**HAB** – štetno cvjetanje algi

**IMTA** – Integrirana multitrofička akvakultura

**LCA** – procjena životnog ciklusa

**MO** – Optimizacija s više ciljeva

**NE** – Neto energija

**pH** – ljestvica koja se koristi za mjerenje kiselosti ili bazičnosti vode

**ppt** – dijelovi na tisuću

**PUFA** – Polinezasićene masne kiseline

**RAS** – recirkulacijski sustav akvakulture

**SCO** – jednostanični organizmi.



## SADRŽAJ

# Turiny

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Predgovor .....                                                                                   | 3         |
| Kratice .....                                                                                     | 4         |
| <b>Poglavlje 1. Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode i utjecaj na akvakulturu .....</b> | <b>9</b>  |
| Uvod.....                                                                                         | 9         |
| 1. Utjecaj globalnog zatopljenja na kvalitetu vode .....                                          | 10        |
| 1.1. Temperaturne promjene i njihov utjecaj na ekosustav.....                                     | 10        |
| 1.2. Kemijski sastav: kiselost, slanost i nutrijenti .....                                        | 12        |
| 1.3. Hidrološki ekstremi i njihove posljedice na kvalitetu vode.....                              | 16        |
| 2. Utjecaj globalnog zatopljenja na ranjivost vrsta akvakulture .....                             | 17        |
| 1.4. Ekološka i ekonomska osjetljivost vrsta .....                                                | 17        |
| 1.5. Geografska redistribucija i klimatska prilagodba .....                                       | 20        |
| Sažetak .....                                                                                     | 22        |
| Literatura .....                                                                                  | 23        |
| <b>Poglavlje 2. Utjecaj akvakulture na okoliš iz perspektive globalnog zatopljenja .....</b>      | <b>26</b> |
| Uvod.....                                                                                         | 26        |
| 1. Staklenički plinovi i ugljični otisak .....                                                    | 27        |
| 1.1. Izvori emisija stakleničkih plinova u kontekstu ekspanzije akvakulture .....                 | 27        |
| 1.2. Glavni izvori stakleničkih plinova .....                                                     | 29        |
| 2. Potrošnja energije i održivost.....                                                            | 30        |
| 2.1. Izvori energije i njihov utjecaj na okoliš.....                                              | 30        |
| 2.2. Energetski intenzivne djelatnosti u akvakulturi .....                                        | 31        |
| 3. Prenamjena zemljišta i promjena staništa .....                                                 | 32        |
| 4. Proizvodnja hrane za životinje i korištenje resursa.....                                       | 33        |
| 4.1. Hrana za akvakulturu i alternativni izvori.....                                              | 33        |
| 4.2. Utjecaj proizvodnje hrane za akvakulturu na okoliš.....                                      | 34        |
| 4.3. Odabir hrane za životinje i prehrana u akvakulturi.....                                      | 35        |
| 5. Zagađenje i zaostale tvari.....                                                                | 36        |
| 5.1. Onečišćenje hranjivim tvarima .....                                                          | 37        |



|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2. Utjecaji antibiotika i uporabe kemikalija .....                                                       | 38        |
| Sažetak .....                                                                                              | 39        |
| Literatura .....                                                                                           | 39        |
| <b>Poglavlje 3. Globalno zagrijavanje i razmnožavanje, biotehnologija u akvakulturi .....</b>              | <b>43</b> |
| Uvod.....                                                                                                  | 43        |
| 1. Klimatske promjene i razmnožavanje vrsta .....                                                          | 44        |
| Promjene u uzgojnim ciklusima.....                                                                         | 44        |
| 1.1. Genetska prilagodba klimatskim promjenama.....                                                        | 45        |
| 2. Napredne metode uzgoja.....                                                                             | 46        |
| 2.1. Selektivni uzgoj.....                                                                                 | 46        |
| 2.2. Genomska selekcija.....                                                                               | 46        |
| 3. Genetski inženjering i CRISPR.....                                                                      | 48        |
| 1.1. Genetski inženjering u akvakulturi .....                                                              | 48        |
| 1.2. CRISPR u akvakulturi.....                                                                             | 50        |
| 4. Tehnologije krioprezervacije i potpomognute oplodnje .....                                              | 55        |
| 1.3. Akvakultura i krioprezervacija.....                                                                   | 55        |
| 1.4. Krioprezervacija embrija.....                                                                         | 58        |
| 5. Etička, ekološka i regulatorna razmatranja .....                                                        | 60        |
| 1.5. Etička pitanja u biotehnologiji akvakulture .....                                                     | 60        |
| 1.6. Regulatorni okviri .....                                                                              | 61        |
| 1.7. Utjecaji biotehnologije akvakulture na okoliš .....                                                   | 62        |
| Sažetak .....                                                                                              | 64        |
| Literatura .....                                                                                           | 65        |
| <b>Poglavlje 4. Promjene u hrani i prehranbenim praksama u akvakulturi zbog globalnog zatopljenja.....</b> | <b>68</b> |
| Uvod.....                                                                                                  | 68        |
| 1. Promjene u nutritivnoj fiziologiji.....                                                                 | 69        |
| 1.1. Temperatura i metabolizam .....                                                                       | 69        |
| 1.2. Probava i apsorpcija hranjivih tvari .....                                                            | 69        |
| 2. Održivi sastojci hrane za životinje u akvakulturi.....                                                  | 71        |
| 2.1. Alternativni izvori hrane/bjelančevina.....                                                           | 71        |
| 2.2. Smanjenje utjecaja hrane za životinje za akvakulturu na okoliš.....                                   | 77        |
| 3. Prakse upravljanja prehranom.....                                                                       | 78        |



|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1. Tehnike preciznog hranjenja .....                                                                 | 78        |
| 3.2. Tehnologije prethodne obrade i fermentirana hrana za životinje za hranidbu u akvakulturi .....    | 80        |
| 4. Ublažavanje učinaka zakiseljavanja oceana .....                                                     | 81        |
| 4.1. Puferska sredstva za ublažavanje zakiseljavanja oceana .....                                      | 81        |
| 4.2. Prehrambene strategije za ublažavanje zakiseljavanja oceana .....                                 | 82        |
| 5. Poboljšanje učinkovitosti i probavljivosti hrane .....                                              | 83        |
| 5.1. Obrada ekstruzijom .....                                                                          | 83        |
| 5.2. Funkcionalni dodaci hrani za životinje .....                                                      | 83        |
| Sažetak .....                                                                                          | 87        |
| Literatura .....                                                                                       | 88        |
| <b>Poglavlje 5. Učinci globalnog zatopljenja na bolesti u akvakulturi i zaštitnim primjenama .....</b> | <b>96</b> |
| Uvod .....                                                                                             | 96        |
| 1. Uobičajene bolesti i njihovi učinci .....                                                           | 98        |
| 1.1. Klasifikacija i ključni simptomi .....                                                            | 98        |
| 1.2. Zarazne bolesti prema vrsti patogena .....                                                        | 101       |
| 1.3. Glavne bolesti mekušaca, rakova .....                                                             | 104       |
| 1.4. Širenje patogena u akvakulturi .....                                                              | 105       |
| 2. Zaštitne mjere i biotehnološke primjene za ublažavanje utjecaja bolesti .....                       | 106       |
| 2.1. Filozofija kontrole bolesti .....                                                                 | 107       |
| 2.2. Biotehnologije u upravljanju bolestima .....                                                      | 109       |
| 2.3. Integrirane strategije upravljanja patogenima u uzgoju ribe .....                                 | 111       |
| 3. Klimatski utjecaji na bolesti i buduća rješenja .....                                               | 115       |
| 3.1. Utjecaj klimatskih čimbenika .....                                                                | 115       |
| 3.2. Genetski inženjering, odabir potpomognut markerima i CRISPR .....                                 | 116       |
| 3.3. Odgovor na izazove budućnosti .....                                                               | 117       |
| Sažetak .....                                                                                          | 118       |
| Literatura .....                                                                                       | 118       |
| Uvod .....                                                                                             | 119       |
| 1. Klimatski izazovi za sustave akvakulture .....                                                      | 120       |
| 1.1. Toplinski stres .....                                                                             | 120       |
| 1.2. Eutrofikacija i proliferacija bolesti .....                                                       | 121       |



|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 1.3. Zakiseljavanje oceana i promjene saliniteta.....        | 121        |
| 2. Ključni kriteriji za odabir sustava .....                 | 121        |
| 2.1. Otpornost na promjene u okolišu .....                   | 122        |
| 2.2. Energetska učinkovitost i ugljični otisak .....         | 122        |
| 3. Inovativni sustavi za rješavanje klimatskih izazova ..... | 124        |
| 4. Politika i ekonomska razmatranja .....                    | 125        |
| 4.1. Međunarodna suradnja i svijest potrošača .....          | 126        |
| Sažetak .....                                                | 127        |
| Literatura .....                                             | 128        |
| <b>Rječnik.....</b>                                          | <b>131</b> |

# Poglavlje 1. Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode i utjecaj na akvakulturu

izv. prof. dr. sc. Anželika Dautartė  
Sveučilište Vytautas Magnus

## Uvod

Porast globalnih temperatura zbog klimatskih promjena značajno utječe na vodene ekosustave, posebno na metaboličke procese i procese rasta vodenih vrsta. Povišene temperature ubrzavaju metabolizam, povećavajući potrebe vodenih organizama za kisikom, što može dovesti do rasta i reproduktivnih izazova. Ovo poglavlje istražuje odnos između temperaturnih promjena i fizioloških procesa vodenih vrsta, pružajući uvid kako ta dinamika utječe na kvalitetu vode i zdravlje ekosustava. Klimatske promjene također duboko utječu na obalne i ekosustave estuarija, a promjene saliniteta se pojavljuju kao kritična posljedica. Otapanje polarnog leda i promijenjeni obrasci oborina značajno pridonose promjenama u razinama saliniteta, posebno u regijama u blizini pritoka slatke vode. Te promjene predstavljaju izazov vodenim organizmima koji ovise o stabilnom salinitetu, mijenjajući dinamiku ekosustava i prijeteći biološkoj raznolikosti (Guimbeau i sur., 2024; Mensah i sur., 2025).

Promjene saliniteta zbog klimatskih promjena dodatno narušavaju morske ekosustave. Njegove varijacije, potaknute otapanjem polarnog leda, promijenjenim obrascima oborina i povećanjem stope isparavanja, utječu na rasprostranjenost morskih vrsta, biološku raznolikost i kompliciraju operacije akvakulture. Opterećenje hranjivim tvarima iz poljoprivrede, industrijske i urbanog zagađenja povećava eutrofikaciju, što dovodi do štetnog cvjetanja algi (HAB), iscrpljivanja kisika i ozbiljnih poremećaja u morskim i slatkovodnim ekosustavima. Eutrofikacija, koja sve više prevladava zbog antropogenog utjecaja i klimatskih promjena, ima široke ekološke i ekonomske posljedice (Zhang i sur., 2024; Mensah i sur., 2025).

Dostupnost i kvaliteta vode sve su više ugroženi pritiscima klimatskih promjena i ljudskih aktivnosti. Suše i nestašica vode, pogoršani porastom temperatura i nepredvidivim obrascima oborina, mijenjaju hidrološke cikluse na globalnoj razini. Istodobno, degradirana kvaliteta vode zbog onečišćenja i lošeg upravljanja predstavlja značajne izazove za ekosustave i ljudsku populaciju (DeNicola i sur., 2015; Moussa i sur., 2025). Globalno zatopljenje također predstavlja izazove za akvakulturu mijenjajući okolišne uvjete važne za vodene vrste. Kako temperatura vode raste, mnoge se vrste bore da napreduju izvan svojih optimalnih toplinskih raspona, što dovodi do smanjenih prinosa i povećane smrtnosti. Nadalje, toplije vode stvaraju idealne uvjete za patogene i parazite, pogoršavajući rizike za akvakulturu (DeNicola i sur., 2015.; Moussa i sur., 2025). Ova međusobno povezana pitanja značajno utječu na održivost i profitabilnost akvakulture.

Geografska rasprostranjenost zona akvakulture mijenja se globalnim zatopljenjem. Porast temperature mora, promjena oceanskih struja i promjena obrasca oborina mijenjaju prikladnost tradicionalnih regija. Ta promjena zahtijeva strateške prilagodbe, kao što je premještanje operacija u

nove prikladne zone, a istovremeno se suočava s izazovima koje predstavljaju invazivne vrste, koje uspijevaju u promijenjenim uvjetima i narušavaju autohtone ekosustave. Ovi poremećaji nose značajne socioekonomske i ekološke posljedice, što zahtijeva hitnu pozornost kreatora politika, istraživača i dionika u industriji.

## 1. Utjecaj globalnog zatopljenja na kvalitetu vode

### 1.1. Temperaturene promjene i njihov utjecaj na ekosustav

#### 1.1.1. Mehanizmi toplinske stratifikacije i iscrpljivanja kisika

Toplinska stratifikacija nastaje kada razlike u temperaturi vode stvaraju različite slojeve unutar vodenog tijela. Ovaj proces pogoršava globalno zatopljenje, jer rastuće površinske temperature pojačavaju razdvajanje između toplije, lakše površinske vode i hladnije, gušće duboke vode. Ovi slojevi ometaju vertikalno miješanje, ograničavajući kretanje kisika prema dolje i kretanje hranjivih tvari prema gore. Posljedično, razina kisika u dubljim vodama opada, što dovodi do hipoksije ili anoksičnih uvjeta, što ozbiljno utječe na morske ekosustave (Bhuiyan i sur., 2024; Burke i sur., 2022). Iscrpljivanje kisika posebno je izraženo u područjima sa slabom ventilacijom i visokom razgradnjom organske tvari. Na primjer, istočni tropski Pacifik (ETP) i Arapsko more pokazuju opsežne zone minimalnog kisika (OMZ), gdje su razine otopljenog kisika ispod 20  $\mu\text{mol/L}$ , protežući se na dubinama od 100 do 1000 metara. Ove regije ističu odnos između spore oceanske cirkulacije, raspadanja organske tvari i ograničene nadoknade kisika (Bhuiyan i sur., 2024).

#### *Regionalni i globalni trendovi*

Globalno, sadržaj kisika u oceanima smanjio se za otprilike 2% od 1960. godine. Ovaj trend se pripisuje pojačanoj stratifikaciji, eutrofikaciji i zagrijavanju. Obalne regije, uključujući Meksički zaljev i zaljev Chesapeake, doživjele su značajna širenja hipoksičnih zona, koje se obično nazivaju "mrtve zone". Ta su područja u velikoj mjeri potaknuta otjecanjem hranjivih tvari, što potiče cvjetanje algi, koje dovodi do povećane razgradnje organske tvari i potrošnje kisika (Bhuiyan i sur., 2024).

Satelitski modeli pružaju vrijedan uvid u dinamiku otopljenog kisika, pokazujući kako varijacije temperature i saliniteta koreliraju s razinama kisika. Na primjer, regije pod utjecajem upwelling-a, kao što je Kalifornijska struja, otkrivaju veću varijabilnost kisika zbog međudjelovanja hladnih voda bogatih hranjivim tvarima i biološke produktivnosti (Sundararaman i Shanmugam, 2024).

#### *Utjecaji na morski život*

Iscrpljivanje kisika izravno utječe na vodene vrste smanjenjem nastanjivih zona i promjenom dinamike ekosustava. Najviše pate sesilni organizmi i bentoska fauna, jer ne mogu pobjeći od uvjeta s niskim udjelom kisika. Ribe i pokretni beskralješnjaci suočavaju se s kompresijom staništa, tjerajući ih u pliće slojeve bogate kisikom, što povećava konkurenciju i rizik od grabežljivaca. Nadalje, produljena hipoksija može poremetiti reprodukciju i rast, što dovodi do smanjenja populacije komercijalno važnih vrsta (Burke i sur., 2022; Sundararaman i Shanmugam, 2024).

### *Strategije ublažavanja*

1. **Poboljšani monitoring.** Napredak u daljinskim istraživanjima i biogeokemijskim modelima pruža podatke u stvarnom vremenu o dinamici kisika i hranjivih tvari, pomažući u ranom otkrivanju hipoksičnih stanja.
2. **Upravljanje hranjivim tvarima.** Smanjenje poljoprivrednog otjecanja i provedba održivih poljoprivrednih praksi mogu ublažiti eutrofikaciju i povezano iscrpljivanje kisika.
3. **Sustavi oksigenacije.** U akvakulturi su tehnologije kao što su ubrizgavanje tekućeg kisika i sustavi za prozračivanje korištene za ublažavanje stresa s niskim udjelom kisika u ribogojilištima, s mješovitim uspjehom ovisno o uvjetima okoliša (Burke i sur., 2022).
4. **Ublažavanje klimatskih promjena.** Rješavanje temeljnih uzroka globalnog zatopljenja smanjenjem emisija ugljika ključno je za preokretanje trendova stratifikacije i očuvanje morske biološke raznolikosti (Bhuiyan i sur., 2024).

#### *1.1.2. Stope metabolizma i potreba za kisikom*

Više temperature izravno utječu na stopu metabolizma vodenih organizama, što dovodi do povećanja potrošnje kisika kako bi se zadovoljile povećane potrebe za energijom. Studije pokazuju da hipoksija ovisna o temperaturi predstavlja značajan izazov, jer se dostupnost kisika smanjuje s porastom temperature, čime se ograničavaju aerobni kapaciteti organizama (Seibel, 2024). Na primjer, metabolički indeks pokazuje da opskrba kisikom postaje nedovoljna na višim temperaturama, ograničavajući rast i reprodukciju (Deutsch i sur., 2020).

Ribe su posebno ranjive, jer povišeni metabolizam zahtijeva veći unos kisika, što je teško postići u toplijim vodama sa smanjenom topljivošću kisika. Ovaj fiziološki stres ne samo da ometa rast, već utječe i na stope preživljavanja, posebno za vrste koje nastanjuju plitko ili toplinski stratificirano okruženje (Okon i sur., 2024).

#### *Izazovi rasta i reprodukcije*

Porast temperature značajno mijenja putanje rasta i reproduktivne cikluse vodenih vrsta. Za mnoge ribe toplijih voda dovode do ranijeg sazrijevanja, ali kraćeg životnog vijeka, narušavajući dinamiku populacije i ravnotežu ekosustava (Liu i sur., 2024). Štoviše, povišene temperature mogu narušiti kvalitetu spolnih stanica i uspjeh mrijesta, smanjujući reproduktivnu proizvodnju. Na primjer, vrste u sjeverozapadnom Pacifiku pokazale su promjene u svojim reproduktivnim strategijama kao izravan odgovor na promjenu toplinskih režima, naglašavajući dubok utjecaj temperature na osobine životnog ciklusa (Liu i sur., 2024).

#### *Utjecaji na zdravlje ekosustava*

Kaskadni učinci metaboličkih promjena i promjena rasta proširuju se na šire zdravlje ekosustava. Povećane stope metabolizma dovode do većeg unosa hranjivih tvari i izlučivanja otpada, što može pogoršati eutrofikaciju u vodama bogatim hranjivim tvarima. Osim toga, toplinski stres može oslabiti imunološke odgovore, čineći vrste osjetljivijima na patogene i bolesti, kao što je uočeno u globalnim sustavima akvakulture (Okon i sur., 2024). Ove interakcije naglašavaju kritičnu potrebu za integriranim strategijama upravljanja za ublažavanje klimatskih stresora na vodene ekosustave.

## **Adaptivni odgovori i strategije ublažavanja**

Vodene vrste pokazuju različite stupnjeve fenotipske plastičnosti kako bi se nosile s toplinskim stresom. Eurihalinske vrste, na primjer, prilagođavaju svoje osmoregulacijske mehanizme kako bi upravljale povećanim salinitetom i temperaturnim fluktuacijama (Esbaugh, 2025). Međutim, opseg takvih prilagodbi ograničen je energetskim ograničenjima, što naglašava važnost proaktivnih mjera za ublažavanje utjecaja temperature.

Učinkovite strategije uključuju obnavljanje obalne vegetacije kako bi se zasjenila vodna tijela i smanjilo toplinsko opterećenje, kao i poboljšanje protoka vode u slojevitim sustavima kako bi se poboljšala raspodjela kisika. Nadalje, globalni naponi za suzbijanje emisija stakleničkih plinova i dalje su ključni za rješavanje temeljnih uzroka povećanja temperature uzrokovanog klimatskim promjenama (Seibel, 2024).

### **1.2. Kemijski sastav: kiselost, slanost i nutrijenti**

#### **1.2.1. Razine pH i zakiseljavanje oceana**

Apsorpcija ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) u oceanima primarni je pokretač zakiseljavanja oceana, uzrokujući mjerljiv pad razine pH. Od predindustrijske ere, pH površinskog oceana smanjio se za približno 0,1 jedinicu, što predstavlja povećanje koncentracije vodikovih iona za 26% (Duarte i sur., 2022). Ovo zakiseljavanje rezultat je kombiniranja  $\text{CO}_2$  s morskom vodom u ugljičnu kiselinu, koja se disocira na bikarbonatne i vodikove ione, snižavajući pH i smanjujući dostupnost karbonatnih iona (Grabba i sur., 2024). Karbonatni ioni neophodni su za kalcifikaciju organizama, kao što su školjke i koralji, za izgradnju i održavanje njihovih struktura kalcijevog karbonata. Smanjena dostupnost karbonata povezana je s tanjim, slabijim ljuskama i smanjenim integritetom kostura kod morskih vrsta (Andreyeva et al., 2024).

Zakiseljavanje oceana ozbiljno utječe na kalcificirajuće organizme, koji su posebno osjetljivi na promjene u karbonatnim stanjima zasićenja. Laboratorijske studije na školjkašima, kao što su dagnje i kamenice, pokazuju da smanjeni pH uvjeti ometaju stvaranje ljuske, odgađaju razvoj i povećavaju stope smrtnosti tijekom ranih životnih faza (Hamilton i sur., 2022). Na primjer, dagnja *Mytilus galloprovincialis* pokazala je otpornost na nizak pH, ali još uvijek doživljava povećane ozljede ljuske i smanjene stope rasta u zakiseljenim uvjetima (Andreyeva i sur., 2024). Takvi fiziološki stresovi ugrožavaju opstanak i performanse ovih vrsta u prirodnim staništima i u akvakulturnim sustavima.

Zakiseljavanje oceana također narušava nekalcificirajuće vrste mijenjajući osjetilne funkcije, rast i razmnožavanje. Promjene u ponašanju, poput smanjenog izbjegavanja grabežljivaca i promijenjenih preferencija staništa, primijećene su kod riba i beskralješnjaka u uvjetima niskog pH (Grabba i sur., 2024). Nadalje, zakiseljavanje u kombinaciji s drugim stresorima, kao što je hipoksija, pogoršava te negativne učinke, što dovodi do složenog utjecaja na morsku biološku raznolikost (Andreyeva i sur., 2024).

#### **Ekonomске i ekološke posljedice**

Ekonomske posljedice zakiseljavanja oceana su duboke, posebno za industrije koje se oslanjaju na kalcificirajuće organizme. Ribolov školjkaša i akvakultura suočavaju se sa znatnim izazovima, s predviđenim gubicima u proizvodnji i tržišnoj vrijednosti zbog smanjene kvalitete školjki i stopa

preživljavanja (Mangi i sur., 2018). U Ujedinjenoj Kraljevini gospodarski gubici koji se pripisuju zakiseljavanju oceana mogli bi se kretati od 14 % do 28 % sadašnje vrijednosti neto ribolova u scenarijima s visokim emisijama (Mangi i sur., 2018). Ti gospodarski pritisci naglašavaju hitnost rješavanja problema zakiseljavanja kako bi se zaštitili morski resursi i sredstva za život.

Iz ekološke perspektive, poremećaj morskih prehrambenih mreža ključna je briga. Smanjene populacije kalcificirajućih organizama mogu imati kaskadne učinke na dinamiku grabežljivaca i plijena, kruženje hranjivih tvari i ukupnu stabilnost ekosustava (Duarte i sur., 2022). Integrirani pristupi, kao što su multitrofički sustavi akvakulture, pokazali su se obećavajuće u ublažavanju ovih utjecaja korištenjem morskih algi za puferiranje razina pH i podršku kalcificirajućim vrstama (Hamilton i sur., 2022).

### ***Strategije ublažavanja i izgledi za budućnost***

Rješavanje problema zakiseljavanja oceana zahtijeva koordinirane globalne napore za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> i provedbu prilagodljivih strategija. Obnova livada morske trave i mangrova može poboljšati otpornost obale apsorpcijom CO<sub>2</sub> i pružanjem utočišta morskim organizmima (Hamilton i sur., 2022). Osim toga, unaprjeđenje praksi akvakulture za uključivanje tehnika puferiranja pH, kao što je upotreba morskih algi, može ublažiti utjecaj zakiseljavanja na uzgoj školjaka (Hamilton i sur., 2022).

Dugoročno praćenje i istraživanje ključni su za razumijevanje višestrukih učinaka zakiseljavanja i razvoj učinkovitih politika. Pojačana međunarodna suradnja i integracija znanstvenih spoznaja u okvire politika, kao što je Globalni okvir za biološku raznolikost iz Kunminga i Montreala, ključni su za ublažavanje zakiseljavanja i zaštitu morske biološke raznolikosti (Grabba i sur., 2024).

#### ***1.2.2. Promjene u salinitetu***

Primarni pokretači fluktuacija saliniteta uključuju priljeve slatke vode iz topljenja ledenjaka, povećane oborine i sezonske varijacije u riječnom ispuštanju. Na primjer, u sjevernom zaljevu Aljaske, unosi slatke vode iz ledenih slivova doprinose izraženim sezonskim i prostornim varijacijama u salinitetu. Te su promjene dodatno modulirane miješanjem vjetra i obalnim strujama, koje utječu na raspodjelu slatkovodnih dijelova (Reister i sur., 2024). Slično tome, Beringovo more doživjelo je značajno osvježanje zbog smanjene proizvodnje morskog leda i povećanih količina otopljene vode, što je dovelo do oslabljene stratifikacije i promjena u kruženju hranjivih tvari (Mensah i sur., 2025).

### ***Utjecaji na morske i estuarijske organizme***

Organizmi koji nastanjuju estuarijska i obalna područja vrlo su osjetljivi na fluktuacije saliniteta. Za vrste koje se oslanjaju na stabilan salinitet, kao što su školjkaši i specifične populacije riba, promjene u salinitetu mogu poremetiti fiziološke procese, uključujući osmoregulaciju, rast i razmnožavanje (Guimbeau i sur., 2024). Na primjer, studije u Bangladešu otkrivaju da povećana izloženost salinitetu tijekom kritičnih razvojnih razdoblja dovodi do usporenog rasta kod djece, naglašavajući šire socio-ekološke posljedice promjena saliniteta (Guimbeau i sur., 2024).

Estuarijski sustavi, poput onih u zaljevu Chesapeake, suočavaju se sa složenim stresom zbog obogaćivanja hranjivih tvari i promjena saliniteta. Povišene razine saliniteta povezane su sa

smanjenom raznolikošću vrsta i promjenama u sastavu zajednice, jer manje tolerantne vrste zamjenjuju oportunistički generalisti (Zhang i sur., 2024). Ovo smanjenje biološke raznolikosti ima kaskadne učinke na stabilnost prehrambene mreže i usluge ekosustava.

### ***Šire ekološke i socioekonomske posljedice***

Fluktuacije saliniteta utječu ne samo na biološku raznolikost, već i na produktivnost obalnog ribarstva i akvakulture. Na primjer, prodor slane vode u slatkovodne sustave smanjuje dostupnost staništa pogodnih za slatkovodne i bočate vrste. U akvakulturi, fluktuirajući salinitet otežava održavanje optimalnih uvjeta, utječući na rast i opstanak kultiviranih vrsta (Mensah i sur., 2025).

Nadalje, ove promjene pogoršavaju postojeće ranjivosti u obalnim zajednicama. Smanjena poljoprivredna produktivnost u regijama poput delte Ganges-Brahmaputra povezana je sa salinizacijom vode za navodnjavanje, naglašavajući socio-ekonomske učinke fluktuacija saliniteta (Guimbeau i sur., 2024).

### ***Strategije ublažavanja i prilagodbe***

Rješavanje utjecaja fluktuacija saliniteta zahtijeva integrirane strategije upravljanja. Obnavljanje obalne vegetacije, poput mangrova i morskih cvjetnica, može ublažiti promjene saliniteta stabilizacijom sedimenata i povećanjem zadržavanja vode. Osim toga, poboljšano modeliranje dotoka slatke vode i dinamike saliniteta može informirati o prilagodljivim praksama upravljanja, kao što je izmjena rasporeda navodnjavanja i odabir sorti usjeva otpornih na sol (Zhang i sur., 2024).

U širem smislu, smanjenje emisija stakleničkih plinova ključno je za ublažavanje temeljnih pokretača klimatskih promjena. Ulaganja u globalne sustave praćenja i planove prilagodbe na razini zajednice mogu dodatno povećati otpornost na promjene saliniteta u ranjivim regijama (Guimbeau i sur., 2024; Mensah i sur., 2025).

### ***Mehanizmi distribucijskih promjena izazvanih salinitetom***

Fluktuacije saliniteta prvenstveno su potaknute priljevima slatke vode, topljenjem ledenjaka i promjenjivim obrascima oborina. Na primjer, obalna područja u blizini estuarija doživljavaju značajnu varijabilnost saliniteta zbog sezonskih i klimatskih promjena (Guimbeau i sur., 2024). U ušćima zapadne Australije hipersalinitet se razvija kada se dotok slatke vode smanji, a isparavanje premašuje unos vode, prisiljavajući vrste da migriraju u manje slana područja ili se suočavaju s padom populacije (Hoeksema i sur., 2023).

Morski organizmi pokazuju različitu toleranciju na promjene saliniteta, što utječe na njihovu distribuciju. Eurihaline vrste, sposobne prilagoditi se širokim rasponima saliniteta, dominiraju područjima s fluktuirajućim salinitetom. Međutim, stenohalinske vrste, kojima je potrebna stabilna razina saliniteta, često se povlače ili trpe pad populacije kada salinitet odstupa od optimalnih razina (Rahman i Hung, 2024).

### ***Utjecaji na rasprostranjenost vrsta i akvakulturu***

Promjene saliniteta značajno mijenjaju prostornu raspodjelu morskih vrsta. Na primjer, dubinska kozica *Parapenaeus longirostris* u Sredozemnom moru pomaknula je svoj raspon kao odgovor na zagrijavanje i zaslaničavanje, a populacije se kreću prema sjeveru i dublje kako bi se izbjegli

nepovoljniji uvjeti (Mingote i sur., 2024). Ove promjene narušavaju lokalne ekosustave i ribarstvo mijenjajući dinamiku grabežljivaca i plijena i dostupnost resursa.

Operacije akvakulture također se suočavaju s izazovima zbog varijabilnosti saliniteta. Vrste poput gavuna, koje su osjetljive na salinitet tijekom razmnožavanja, pokazuju smanjenu pokretljivost spermija i uspjeh oplodnje u neoptimalnim uvjetima saliniteta. To utječe na rad mrijestilišta i održivost praksi akvakulture (Rahman i Hung, 2024). U Bangladešu je progresivna salinizacija ograničila produktivnost akvakulture i dovela do povećane socioekonomske ranjivosti u obalnim zajednicama (Guimbeau i sur., 2024).

### ***Šire ekološke i socioekonomske implikacije***

Promjene u distribuciji vrsta uzrokovane salinitetom imaju kaskadne učinke na usluge ekosustava. Promjene u sastavu zajednice utječu na kruženje hranjivih tvari, primarnu proizvodnju i stabilnost morskih hranidbenih mreža (Hoeksema i sur., 2023). Na primjer, kako se hipersalinitet razvija u estuarijima, brojnost vrsta koje žive u estuariju opada, što dovodi do smanjenja biološke raznolikosti i promijenjenog funkcioniranja ekosustava.

Ekonomski gledano, ribarstvo koje se oslanja na određene vrste suočava se s neizvjesnostima jer ciljane populacije migriraju u manje dostupna područja. To je primijećeno na Mediteranu, gdje su promjene saliniteta i temperature utjecale na dostupnost ekonomski vrijednih vrsta poput dubinske kozice (Mingote i sur., 2024). Osim toga, fluktuacije saliniteta predstavljaju izazove za akvakulturu, što zahtijeva ulaganja u prilagodljivu infrastrukturu i prakse za ublažavanje utjecaja na proizvodnju.

### ***Strategije ublažavanja i budućí smjerovi***

Rješavanje utjecaja promjena saliniteta na rasprostranjenost morskih vrsta zahtijeva integrirane strategije upravljanja. Naponi bi se trebali usredotočiti na smanjenje emisija stakleničkih plinova kako bi se ublažile klimatske promjene i stabilizirali okolišni uvjeti. Obnavljanje obalne vegetacije, poput mangrova i morskih cvjetnica, može ublažiti promjene saliniteta i osigurati stanište morskim organizmima (Guimbeau i sur., 2024).

Akvakulturne operacije mogu imati koristi od tehnoloških inovacija, kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) i selektivni uzgoj vrsta otpornih na sol. Poboljšani modeli praćenja i predviđanja promjena saliniteta također mogu poslužiti kao temelj za prilagodljive strategije upravljanja, osiguravajući otpornost akvakulture i ribarstva na izazove izazvane salinitetom (Rahman i Hung, 2024).

#### ***1.2.3. Mehanizmi opterećenja hranjivim tvarima i eutrofikacija***

Višak hranjivih tvari, posebno dušika i fosfora, unosi se u vodene sustave otjecanjem iz poljoprivrednih površina, komunalnih otpadnih voda i industrijskih otpadnih voda. Ove hranjive tvari potiču rast fitoplanktona i algi, što dovodi do cvjetanja algi koje iscrpljuju razinu kisika dok se razgrađuju (Reister i sur., 2024). U Meksičkom zaljevu, opterećenje hranjivim tvarima iz sliva rijeke Mississippi stvorilo je jednu od najvećih hipoksičnih zona na svijetu, utječući na ribarstvo i biološku raznolikost (Day i sur., 2024).

Klimatske promjene pogoršavaju opterećenje hranjivim tvarima zbog povećanih oborina i ekstremnih vremenskih prilika, što povećava otjecanje hranjivih tvari u vodena tijela. Porast temperatura dodatno

doprinosi eutrofikaciji ubrzavanjem rasta algi i promjenom dinamike ekosustava (Mensah i sur., 2025). Ovi složeni učinci pojačavaju učestalost i trajanje HAB-ova, koji oslobađaju toksine štetne za morski život i ljudsko zdravlje (Zhang i sur., 2024).

### **Utjecaji eutrofikacije**

Eutrofikacija duboko utječe na vodene ekosustave narušavajući hranidbene mreže i smanjujući biološku raznolikost. Iscrpljivanje kisika ili hipoksija prisiljava ribe i beskralješnjake da migriraju ili se suoče sa smrtnošću, dok bentoska staništa pate od anoksije sedimenta (Reister i sur., 2024). Na primjer, studije u zaljevu Chesapeake otkrivaju značajan pad populacija riba zbog ponavljajućih hipoksičnih događaja (Zhang i sur., 2024).

HAB-ovi predstavljaju dodatne izazove stvaranjem toksina koji utječu na morske organizme i ljudsku populaciju. Vrste kao što su *Karenia brevis* i *Microcystis aeruginosa* povezane su s masovnim uginjanjem riba, kontaminacijom školjaka i respiratornim problemima kod ljudi (Mensah i sur., 2025). Ekonomski gubici od HAB-ova su značajni, posebno za ribarstvo, turizam i javno zdravstvo.

### **Strategije ublažavanja**

Učinkovito ublažavanje opterećenja hranjivim tvarima i eutrofikacije zahtijeva integrirano upravljanje slivovima i intervencije politike. Smanjenje poljoprivrednog otjecanja održivim poljoprivrednim praksama, kao što su pokrovni usjevi, tampon zone i precizna gnojidba, može značajno smanjiti unos hranjivih tvari (Reister i sur., 2024). Urbana područja mogu imati koristi od naprednih tehnologija pročišćavanja otpadnih voda koje uklanjaju višak hranjivih tvari prije ispuštanja.

Obnova močvara i obalnih zona nudi prirodna rješenja filtriranjem hranjivih tvari i poboljšanjem kvalitete vode. Osim toga, reforme javnog obrazovanja i politike, uključujući propise o upravljanju hranjivim tvarima i poticaje za održive prakse, ključne su za rješavanje temeljnih uzroka eutrofikacije (Day i sur., 2024).

## **1.3. Hidrološki ekstremi i njihove posljedice na kvalitetu vode**

### **1.3.1. Pokretači suša i nestašice vode**

Suše su prvenstveno potaknute klimatskim varijacijama, uključujući smanjene oborine i porast temperatura, što pojačava evapotranspiraciju. Ljudske aktivnosti, kao što su neodrživo povlačenje vode i degradacija tla, dodatno pogoršavaju ove prirodne pojave (Zucca i sur., 2021). Na primjer, u sušnim regijama poput Saudijske Arabije, desetljeća prekomjernog crpljenja podzemnih voda i loša praksa navodnjavanja iscrpili su kritične vodonosnike, pogoršavajući učinke prirodne nestašice vode (DeNicola i sur., 2015).

Klimatske promjene pojačavaju te izazove mijenjajući obrasce oborina, što dovodi do češćih i ozbiljnijih suša. Zemlje Vijeća za suradnju u Zaljevu (GCC), koje karakterizira hipersušna klima, posebno su ranjive. Brza urbanizacija i rast stanovništva u tim regijama povećavaju potražnju za vodom, opterećujući ionako ograničene resurse. Inovativne strategije, kao što su recikliranje otpadnih voda i desalinizacija, donesene su za rješavanje tih problema, ali one su i dalje energetske intenzivne i ekološki oporezujuće (Moussa i sur., 2025).

### ***1.3.2. Utjecaji pogoršane kvalitete vode***

Degradirana kvaliteta vode često se podudara s nestašicom, jer ograničeni resursi postaju sve zagađeniji poljoprivrednim otjecanjem, industrijskim ispuštanjem i urbanim otpadnim vodama. Na primjer, prekomjerno opterećenje hranjivim tvarima u riječnim slivovima dovodi do eutrofikacije, štetnog cvjetanja algi i hipoksičnih uvjeta koji narušavaju vodene ekosustave i prijete biološkoj raznolikosti (Giri, 2021). U Saudijskoj Arabiji ekstremni vremenski događaji povezani s klimatskim promjenama pogoršavaju onečišćenje vode, unoseći patogene i zagađivače u izvore slatke vode (DeNicola i sur., 2015).

Socioekonomske posljedice pogoršane kvalitete vode su duboke. Loša kvaliteta vode komplicira procese pročišćavanja, povećava troškove i potkopava javno zdravlje. Globalno, bolesti koje se prenose vodom koje su posljedica kontaminirane pitke vode vodeći su uzrok morbiditeta i smrtnosti, posebno u zajednicama s niskim prihodima (Giri, 2021). U GCC-u, smanjenje poljoprivredne proizvodnje uzrokovano nestašicom vode prijete sigurnosti hrane, ilustrirajući kaskadne učinke problema s kvalitetom vode (Moussa i sur., 2025).

### ***Strategije ublažavanja***

Rješavanje dvostrukih izazova suše i degradirane kvalitete vode zahtijeva integrirane pristupe koji kombiniraju tehnološke inovacije, reforme politika i angažman zajednice. Održive prakse upravljanja vodama, kao što su prikupljanje kišnice i učinkoviti sustavi navodnjavanja, ključne su za smanjenje ovisnosti o prekomjerno iskorištenim izvorima vode (Moussa i sur., 2025). Obnova prirodnih ekosustava, kao što su močvare, može poboljšati kvalitetu vode filtriranjem onečišćujućih tvari i regulacijom hidroloških ciklusa (Zucca i sur., 2021).

Napredak u tehnologiji desalinizacije i pročišćavanju otpadnih voda nudi potencijalna rješenja za regije s nedostatkom vode. Međutim, ove tehnologije moraju se primjenjivati na održiv način kako bi se smanjio utjecaj na okoliš i osigurala dostupnost ranjivim populacijama. Međunarodna suradnja i izgradnja kapaciteta ključni su za razmjenu znanja i resursa za globalno rješavanje izazova s vodom (DeNicola i sur., 2015).

## **2. Utjecaj globalnog zatopljenja na ranjivost vrsta akvakulture**

### **1.4. Ekološka i ekonomska osjetljivost vrsta**

#### ***1.4.1. Osjetljivost na temperaturu i ranjivost vrsta***

Vodne vrste ovise o stabilnim temperaturama vode za fiziološke i metaboličke procese. Odstupanja od optimalnih raspona mogu narušiti rast, reprodukciju i preživljavanje. Na primjer, tropske vrste poput kozica i tilapije posebno su osjetljive na temperaturne fluktuacije, koje narušavaju enzimske aktivnosti i metaboličku učinkovitost (Giri, 2021). Studije pokazuju da dugotrajno izlaganje temperaturama izvan granica tolerancije vrste može dovesti do smrtnosti uzrokovane stresom i nižih prinosa akvakulture (DeNicola i sur., 2015).

U regijama kao što je Arapski poluotok, gdje temperature vode rastu brže od globalnog prosjeka, akvakultura se suočava sa složenim izazovima. Više temperature ne samo da smanjuju razinu otopljenog kisika, već i povećavaju toksičnost amonijaka, dodatno ugrožavajući zdravlje vode



(Moussa i sur., 2025). Ovi učinci naglašavaju potrebu za adaptivnim mjerama, kao što je selektivni uzgoj vrsta otpornih na temperaturu i razvoj sustava akvakulture koji reguliraju toplinsko okruženje.

### ***Proliferacija bolesti i parazita***

Više temperature vode ubrzavaju životne cikluse patogena i parazita, što dovodi do češćih i ozbiljnijih izbijanja. Na primjer, bolesti koje uzrokuje *Vibrio* spp. i paraziti poput morskih ušiju uspijevaju na povišenim temperaturama, uzrokujući značajne ekonomske gubitke u akvakulturi (Zucca i sur., 2021). Povećana prevalencija ovih prijetnji dokumentirana je na farmama kozica diljem jugoistočne Azije i farmama lososa u sjevernom Atlantiku, gdje su rastuće temperature površine mora olakšale širenje zaraznih bolesti (DeNicola i sur., 2015).

Odnos između temperature i dinamike bolesti dodatno je kompliciran klimatskim promjenama u kemiji vode, kao što su zakiseljavanje i promjene saliniteta. Ovi faktori mogu oslabiti otpornost domaćina, čineći vrste osjetljivijima na infekcije (Giri, 2021). Učinkovito upravljanje bolestima u akvakulturi stoga zahtijeva kombinaciju poboljšanih sustava praćenja, biosigurnosnih mjera i istraživanja sojeva otpornih na bolesti.

### ***Strategije ublažavanja i prilagodbe***

Rješavanje utjecaja globalnog zatopljenja na akvakulturu zahtijeva proaktivne i integrirane strategije. Tehnološke inovacije, kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi(RAS) i ribnjaci s kontroliranom temperaturom, mogu ublažiti toplinski stres vodenih vrsta (Moussa i sur., 2025). Osim toga, provedba programa cijepljenja i unapređenje tehnologija otkrivanja bolesti mogu pomoći u upravljanju rizicima od patogena.

Kreatori politika i dionici također moraju dati prioritet očuvanju okoliša kako bi stabilizirali ekosustave. Obnova mangrova i močvara, na primjer, može zaštititi farme akvakulture od učinaka temperaturnih fluktuacija i osigurati prirodnu filtraciju patogena. Nadalje, poticanje međunarodne suradnje na praksama akvakulture otpornim na klimatske promjene bit će ključno za održavanje ove vitalne industrije u promjenjivim uvjetima okoliša (Zucca i sur., 2021).

#### ***1.4.2. Ekonomske posljedice utjecaja globalnog zatopljenja na akvakulturu***

Globalno zatopljenje narušava ravnotežu vodenih ekosustava, izravno utječući na populacije riba i školjaka. Porast temperature mora, zakiseljavanje i promjenjive oceanske struje mijenjaju staništa i fiziologiju vodenih vrsta. Na primjer, zagrijavanje oceana smanjuje dostupnost kisika u vodi, opterećuje morski život i dovodi do nižih stopa rasta i reproduktivnog uspjeha (Baag i Mandal, 2022). Ovi stresori rezultiraju znatnim smanjenjem ribljih stokova i prinosa školjaka, s kaskadnim učincima na profitabilnost akvakulture (Doney i sur., 2009).

Kombinirani učinci zagrijavanja i zakiseljavanja značajno narušavaju procese kalcifikacije kod školjaka. Smanjene razine pH ometaju njihov rast i preživljavanje, ugrožavajući dostupnost za akvakulturu. Studije su pokazale da su kalcificirajući organizmi posebno osjetljivi na smanjenje koncentracije karbonatnih iona uzrokovane povećanim atmosferskim CO<sup>2</sup> (Nienhuis i sur., 2010). Kao rezultat toga, radnici u akvakulturi suočavaju se s dvostrukim izazovom ublažavanja utjecaja na okoliš i održavanja razine proizvodnje.

### ***Pad kvalitete vode i izbijanja bolesti***

Kvaliteta vode ključan je čimbenik u akvakulturi, a klimatske promjene dovode do njezinog pogoršanja. Povećane temperature mora potiču širenje štetnog cvjetanja algi (HAB), koje iscrpljuje razinu kisika i oslobađa toksine štetne za vodene vrste. To cvjetanje, potaknuto otjecanjem bogatim hranjivim tvarima i zagrijavanjem voda, povezano je s masovnim izumiranjem riba i ekonomskim gubicima u akvakulturi (USEPA, 2014).

Osim toga, više temperature vode ubrzavaju širenje bolesti među vodenim vrstama. Patogeni uspijevaju u toplijim uvjetima, što dovodi do povećanog izbijanja bolesti u akvakulturnim sustavima. Na primjer, studije o akvakulturi kamenica otkrivaju da zagrijavanje temperature slabi imunitet kamenica i povećava osjetljivost na infekcije, smanjujući stope preživljavanja i proizvodnju (Neokye i sur., 2024). Ovi čimbenici zajedno smanjuju ekonomsku održivost operacija akvakulture povećanjem stope smrtnosti i troškova liječenja.

### ***Troškovi prilagodbe***

Prilagodba izazovima uzrokovanim klimatskim promjenama zahtijeva znatna ulaganja u infrastrukturu i prakse upravljanja. U akvakulturne objekte moraju biti uključene otporne tehnologije, kao što su sustavi s kontroliranom temperaturom i vrste otporne na bolesti, kako bi se održala razina proizvodnje. Međutim, te prilagodbe imaju znatne troškove, što može opteretiti financijska sredstva radnika u akvakulturi, posebno u regijama s niskim dohotkom (Naylor i sur., 2023).

Potreba za mjerama prilagodbe dodatno je naglašena promjenjivom geografskom raspodjelom prikladnih područja akvakulture. Porast razine mora i ekstremni vremenski uvjeti prisiljavaju na premještanje operacija akvakulture u područja sa stabilnijim uvjetima, što povećava troškove premještanja na ekonomsko opterećenje. Nadalje, politike usmjerene na ublažavanje utjecaja na okoliš, kao što su stroži propisi o gospodarenju otpadom i korištenju resursa, zahtijevaju ulaganja u mjere usklađenosti i napredne tehnologije (Garlock i sur., 2022).

### ***Regionalni i globalni učinci***

Gospodarske posljedice globalnog zatopljenja na akvakulturu neravnomjerno su raspoređene. Regije s vrlo osjetljivim ekosustavima, kao što su tropi, suočavaju se s izraženijim izazovima. Visoki salinitet, suša i invazivne vrste ometaju aktivnosti akvakulture, posebno za vrste poput kozica i tilapije. Nasuprot tome, umjerene regije doživljavaju relativno umjerene utjecaje, ali nisu imune na dugoročne učinke klimatskih promjena, kao što su promijenjeni obrasci oborina i povećana učestalost oluja (Mahu i sur., 2022).

Globalno, potražnja za proizvodima akvakulture nastavlja rasti, potaknuta rastom stanovništva i potrebom za održivim izvorima proteina. To stvara paradoksalnu situaciju u kojoj sektor akvakulture mora povećati proizvodnju kako bi zadovoljio potražnju i istodobno se boriti s gospodarskim i ekološkim troškovima prilagodbe klimatskim promjenama. Neuspjeh u rješavanju tih izazova može pogoršati nesigurnost opskrbe hranom i gospodarske razlike (FAO, 2022).

### ***Politika i upravljanje***

Učinkoviti politički okviri ključni su za ublažavanje gospodarskih učinaka globalnog zatopljenja na akvakulturu. Vlade i međunarodne organizacije moraju implementirati strategije za podršku održivim

praksama i promicanje istraživanja otpornih sustava akvakulture. Na primjer, ulaganja u genetska istraživanja za razvoj vrsta otpornih na klimatske promjene i uspostava sustava ranog upozoravanja za HAB-ove mogu smanjiti ranjivost i povećati otpornost sektora (Handisyde i sur., 2017).

Nadalje, uključivanjem politika akvakulture u šire akcijske planove za klimu osigurava se koordinirani pristup rješavanju tih izazova. Politike bi trebale uravnotežiti gospodarski rast s ekološkom održivošću, omogućujući subjektima u akvakulturi da se prilagode bez ugrožavanja ekološkog integriteta (Naylor i sur., 2023).

## 1.5. Geografska redistribucija i klimatska prilagodba

### 1.5.1. Zone premještanja: premještanje u odgovarajuća područja akvakulture

Promjene okoliša izazvane klimatskim promjenama dovode do premještanja zona akvakulture. Rastuće temperature oceana guraju vrste i operacije prema polu, jer mnoga tradicionalna područja akvakulture postaju manje održiva zbog toplinskog stresa i smanjene kvalitete vode (Zarzyczny i sur., 2024). Tropizacija morskog okoliša primjer je ovog fenomena, gdje se tropske vrste šire u umjerene regije, mijenjajući strukture ekosustava i stvarajući nove zajednice (Zarzyczny i sur., 2024).

Osim temperaturnih promjena, promjenjivi obrasci oborina i dostupnost slatke vode utječu na kopnenu akvakulturu. Na primjer, smanjeni protok vode i povećani salinitet u estuarskim regijama utječu na rast vrsta koje se oslanjaju na određene razine saliniteta (Priya i sur., 2023). Kao rezultat toga, operacije akvakulture suočavaju se s povećanim troškovima povezanim s preseljenjem u regije sa stabilnijim i prikladnijim okolišnim uvjetima (Mdoe i sur., 2025). Ovo preseljenje često zahtijeva detaljne procjene utjecaja na okoliš kako bi se identificirala područja koja mogu održivo podržati akvakulturu uz minimiziranje ekološke degradacije.

Osim toga, postupak premještanja nije samo tehnički nego i socioekonomski izazov. Mnoge zajednice koje se oslanjaju na akvakulturu za život mogu se suočiti s raseljavanjem ili gubitkom radnih mjesta ako se operacije presele. Naponi za ublažavanje takvih utjecaja zahtijevaju angažman dionika, programe prekvalifikacije i podršku alternativnim mogućnostima života.

### *Invazivne vrste: ekološki i operativni poremećaji*

Promijenjeni klimatski uvjeti omogućuju širenje invazivnih vrsta koje se natječu s autohtonim vrstama i ometaju operacije akvakulture. Na primjer, tropizacija umjerenih zona olakšava uspostavljanje invazivnih vrsta kao što su riba paun i određene vrste algi, koje mogu nadmašiti autohtone organizme i narušiti zdravlje ekosustava (Woods i sur., 2016). Ove invazije često zahtijevaju od radnika u akvakulturi implementaciju skupih strategija upravljanja kako bi održali razinu proizvodnje.

Nadalje, dolazak invazivnih patogena, olakšan porastom temperatura i globalnom trgovinom, povećava prevalenciju izbijanja bolesti. To je posebno zabrinjavajuće za visokovrijedne vrste poput kozica i lososa, koje su osjetljive na infekcije u toplijim vodama (Ross i sur., 2023). Za rješavanje tih izazova potrebna su znatna ulaganja u biosigurnosne mjere, uključujući poboljšane sustave praćenja i razvoj oblika otpornih na patogene. Istražuju se napredni biotehnološki alati, kao što je uređivanje gena temeljeno na CRISPR-u, kako bi se povećala otpornost na bolesti kod vrsta u akvakulturi.

Invazivne vrste također narušavaju prirodnu ravnotežu ekosustava, što dovodi do gubitka biološke raznolikosti. Na primjer, invazivne alge mogu formirati guste prostrirke koje guše koraljne grebene i korita morske trave, bitna staništa za mnoge morske organizme. Ekološke posljedice nadilaze akvakulturu, utječući na ribarstvo, turizam i ukupnu morsku biološku raznolikost.

### ***1.5.2. Strategije prilagodbe***

Prilagodba tim izazovima uključuje kombinaciju tehnoloških inovacija, političkih intervencija i pristupa temeljenih na ekosustavu. Ključne strategije uključuju:

1. **Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA):** Uključivanjem vrsta s različitih trofičkih razina, IMTA sustavi ublažavaju utjecaje invazivnih vrsta i povećavaju ekološku otpornost (Mdoe i sur., 2025). Ovaj pristup također maksimizira učinkovitost resursa recikliranjem hranjivih tvari unutar sustava.
2. **Genetska poboljšanja.** Razvoj pasmina koje su tolerantnije na temperaturne fluktuacije i bolesti ključni je korak u osiguravanju održivosti operacija akvakulture (Ross i sur., 2023). Selektivni programi uzgoja i genomski alati koriste se za stvaranje sojeva riba i školjkaša koji mogu uspijevati u promjenjivim uvjetima okoliša.
3. **Poboljšani sustavi praćenja i ranog upozoravanja.** Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu i prediktivno modeliranje mogu pomoći operaterima da predvide i odgovore na promjene u uvjetima okoliša i izbijanja invazivnih vrsta (Wang i sur., 2021). Na primjer, satelitske snimke i analitika vođena umjetnom inteligencijom sve se više koriste za praćenje temperature oceana, cvjetanja algi i drugih kritičnih parametara.
4. **Politika i regulacija.** Ključna je provedba i provedba čvrstih politika koje promiču održive prakse i štite biološku raznolikost. Na primjer, politike usmjerene na upravljanje invazivnim vrstama i sprječavanje njihovog širenja mogu smanjiti ekološku i ekonomsku štetu (Priya i sur., 2023). Suradnički međunarodni okviri, kao što su ciljevi održivog razvoja Ujedinjenih naroda, mogu pružiti smjernice i potporu takvim naporima.
5. **Angažman zajednice.** Uspješna prilagodba zahtijeva uključivanje lokalnih zajednica u procese donošenja odluka. Osnaživanje zajednica kroz obrazovanje i inicijative za izgradnju kapaciteta osigurava da su strategije prilagodbe učinkovite i pravedne.

### ***Regionalne razlike u utjecaju***

Utjecaji globalnog zatopljenja na zone akvakulture značajno se razlikuju od regije do regije. Tropske regije, koje već doživljavaju visoke temperature, suočavaju se s najvećim izazovima jer postaju manje prikladne za tradicionalne vrste akvakulture. Nasuprot tome, umjerene regije bilježe priljev tropskih vrsta, što predstavlja mogućnosti za diverzifikaciju, ali i rizike povezane s neravnotežom ekosustava (Zarzyчны i sur., 2024).

Obalne regije posebno su osjetljive na porast razine mora i olujne udare, koji oštećuju infrastrukturu akvakulture i remete proizvodne cikluse. Kao odgovor na to, neke se operacije premještaju u kopnena ili odobalna područja sa stabilnijim uvjetima, iako taj prijelaz uključuje znatne troškove i logističke složenosti (Woods i sur., 2016). Marikultura, iako obećavajuća, zahtijeva napredak u inženjerstvu kako bi izdržala teške uvjete oceana i smanjila ekološki otisak.

Regije sa snažnim upravljačkim i istraživačkim kapacitetima, kao što su sjeverna Europa i Sjeverna Amerika, u boljem su položaju za prilagodbu tim izazovima. Nasuprot tome, regije s niskim prihodima, posebno na globalnom jugu, suočavaju se sa značajnim preprekama, uključujući ograničen pristup financiranju, tehnologiji i stručnosti. Rješavanje ovih razlika ključno je za osiguravanje globalne sigurnosti hrane i pravednog razvoja.

## Sažetak

Toplinska stratifikacija i iscrpljivanje kisika značajne su prijetnje vodenim ekosustavima, s velikim ekološkim i ekonomskim posljedicama. Razumijevanje međudjelovanja fizičkih, kemijskih i bioloških procesa koji pokreću ove promjene ključno je za razvoj učinkovitih strategija ublažavanja. Integracijom tehnološkog napretka i održivih praksi može se bolje upravljati učincima globalnog zatopljenja na vodene sustave.

Rastuće globalne temperature predstavljaju ogromne izazove za vodene vrste povećavajući metaboličke zahtjeve i uzrokujući probleme s rastom i reprodukcijom. Ove fiziološke promjene ne samo da prijete pojedinim vrstama, već i ugrožavaju integritet ekosustava. Sveobuhvatno razumijevanje ove dinamike, zajedno sa ciljanim naporima za ublažavanje, ključno je za zaštitu vodene biološke raznolikosti i održavanje kvalitete vode u klimatskim promjenama.

Fluktuacije saliniteta uzrokovane klimom značajno utječu na obalne i morske ekosustave, narušavajući rasprostranjenost vrsta i operacije akvakulture, a istovremeno predstavljaju izazove ovisnim zajednicama. Rješavanje tih utjecaja zahtijeva holistički pristup koji integrira ekološka i socioekonomska razmatranja. Davanjem prioriteta adaptivnim strategijama, uključujući prakse održivog upravljanja i čvrste političke okvire, moguće je ublažiti te izazove i zaštititi biološku raznolikost i sredstva za život.

Opterećenje hranjivim tvarima i eutrofikacija i dalje su kritične prijetnje vodenim ekosustavima, potičući štetno cvjetanje algi, iscrpljivanje kisika i degradaciju ekosustava. Učinkovite strategije ublažavanja moraju se usredotočiti na smanjenje unosa hranjivih tvari, obnavljanje ravnoteže ekosustava i promicanje suradnje među dionicima, kreatorima politika i znanstvenicima kako bi se postigli održivi ishodi.

Nestašica vode, pogoršana globalnim zatopljenjem i ljudskim aktivnostima, predstavlja značajne izazove za globalnu sigurnost vode. Suše, nepredvidivi obrasci oborina i degradirana kvaliteta vode prijete i ekosustavima i ljudskoj populaciji. Davanje prioriteta održivim praksama upravljanja vodama, poticanje međunarodne suradnje i implementacija inovativnih rješenja ključni su za ublažavanje ovih izazova i zaštitu vitalnih vodnih resursa za buduće generacije.

Globalno zatopljenje također duboko utječe na akvakulturu, povećavajući ranjivost vrsta na temperaturne fluktuacije i eskalirajući rizik od bolesti i parazita. Ti izazovi imaju dalekosežne posljedice za sigurnost opskrbe hranom i gospodarsku stabilnost obalnih zajednica. Suradnički naponi između istraživača, kreatora politika i dionika iz industrije potrebni su za razvoj i provedbu inovativnih rješenja koja povećavaju otpornost i održivost u industriji akvakulture.

Geografska preraspodjela zona akvakulture zbog klimatskih promjena zahtijeva proaktivne strategije prilagodbe. Porast temperature mora, promjenjive struje i promijenjeni obrasci oborina zahtijevaju

premještanje operacija i usvajanje održivih praksi. Integracija tradicionalnog ekološkog znanja s modernim znanstvenim dostignućima može stvoriti holistička rješenja za ove izazove, osiguravajući otpornost industrije akvakulture i njezin kontinuirani doprinos globalnoj sigurnosti hrane.

## Literatura

- Andreyeva, A. Y., Kukhareva, T. A., Gostyukhina, O. L., & Vialova, O. Y. (2024). Impacts of ocean acidification and hypoxia on cellular immunity, oxygen consumption, and antioxidant status in Mediterranean mussel. *Fish and Shellfish Immunology*, 154, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109932>
- Baag, S., & Mandal, S. (2022). Combined effects of ocean warming and acidification on marine fish and shellfish: A molecule to ecosystem perspective. *Science of the Total Environment*, 802, 149807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149807>
- Bhuiyan, M. M. U., Rahman, M., Naher, S., Shahed, Z. H., Ali, M. M., & Islam, A. R. M. T. (2024). Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Burke, M., Grant, J., Filgueira, R., & Swanson, A. (2022). Oxygenation effects on temperature and dissolved oxygen at a commercial Atlantic salmon farm. *Aquacultural Engineering*, 99, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102287>
- Day, J. W., Rybczyk, J. M., & Stephens, J. R. (2024). Climate change effects on nutrient loading and coastal eutrophication. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 6(18), 627–637. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00112-8>
- DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3), 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>
- Deutsch, C., Penn, J. L., & Seibel, B. A. (2020). Climate change constrains fish metabolic scope and habitat suitability globally. *Science Advances*, 6(22), eaax0194. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0194>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Duarte, J. A., Villanueva, R., Seijo, J. C., & Vela, M. A. (2022). Ocean acidification effects on aquaculture of a high resilient calcifier species: A bioeconomic approach. *Aquaculture*, 559, 738426. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738426>
- Esbaugh, A. J. (2025). Physiological responses of euryhaline marine fish to naturally-occurring hypersalinity. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 299, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2024.111768>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org>
- Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Kumar, G., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., & Tveterås, R. (2022). Aquaculture's role in sustainable food systems. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in the twenty-first century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies, and impediments. *Environmental Pollution*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Grabba, K. C., Ghosh, A., Adekunbi, F. O., Williamson, P., & Widdicombe, S. (2024). Ocean acidification: Causes, impacts, and policy actions. In *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 51–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14082-2.00011-9>
- Guimbeau, A., Ji, X. J., Long, Z., & Menon, N. (2024). Ocean salinity, early-life health, and adaptation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102954. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102954>
- Hamilton, S. L., Elliott, M. S., deVries, M. S., Adelaars, J., & Rintoul, M. D. (2022). Integrated multi-trophic aquaculture mitigates the effects of ocean acidification: Seaweeds raise system pH and improve growth of juvenile abalone. *Aquaculture*, 560, 738571. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738571>
- Handisyde, N., Ross, L. G., Badjeck, M.-C., & Allison, E. H. (2017). Climate change and aquaculture: Vulnerability and adaptation in the tropics. *Aquaculture*, 467, 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.012>



- Hoeksema, S. D., Chuwen, B. M., Tweedley, J. R., & Potter, I. C. (2023). Ichthyofaunas of nearshore, shallow waters of normally-closed estuaries are highly depauperate and influenced markedly by salinity and oxygen concentration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108410. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108410>
- Liu, S., Liu, Y., & Xing, Q. (2024). Climate change drives fish communities: Changing multiple facets of fish biodiversity in the Northwest Pacific Ocean. *Science of the Total Environment*, 955, 176854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176854>
- Mahu, E., et al. (2022). Climate-induced hazards and their impacts on aquaculture. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Mangi, S. C., Lee, J., Pinnegar, J. K., & Law, R. J. (2018). The economic impacts of ocean acidification on shellfish fisheries and aquaculture in the United Kingdom. *Environmental Science and Policy*, 86, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008>
- Mdoe, C. N., Mahonge, C. P., & Ngowi, E. E. (2025). Mapping the trends, knowledge production, and practices of climate-smart aquaculture. *Aquaculture*, 598, 741939. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741939>
- Mensah, V., Chen, Y.-C., & Ohshima, K. I. (2025). Multidecadal decline in sea ice meltwater volume and implications for nutrient dynamics. *Progress in Oceanography*, 230, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103377>
- Mingote, M. G., Galimany, E., Sala-Coromina, J., Bahamon, N., Ribera-Altimir, J., Santos-Bethencourt, R., & Clavel-Henry, M. (2024). Warming and salinization effects on the deep-water rose shrimp, *Parapenaeus longirostris*, distribution along the NW Mediterranean Sea: Implications for bottom trawl fisheries. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115838>
- Moussa, L. G., Mohan, M., Arachchige, P. S. P., Rathnasekara, H., Abdullah, M., & Abulibdeh, A. (2025). Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. *Environmental Development*, 54, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101122>
- Naylor, R., et al. (2023). A global view of aquaculture policy. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Neokye, E. O., et al. (2024). Climate change impacts on oyster aquaculture: Part II. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Nienhuis, S., et al. (2010). Ocean acidification effects on calcifying organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 400, 287–302. <https://doi.org/10.3354/meps08307>
- Okon, E. M., Oyesiji, A. A., & Eissa, E. H. (2024). The escalating threat of climate change-driven diseases in fish: Evidence from a global perspective. *Environmental Research*, 263, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120184>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., & Sivarethinamohan, R. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystems. *Environmental Research*, 238, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>
- Rahman, M. M., & Hung, T.-C. (2024). Impact of salinity and body size on sperm motility in three California smelt species. *Aquaculture Reports*, 39, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102503>
- Reister, I., Danielson, S., & Aguilar-Islas, A. (2024). Perspectives on Northern Gulf of Alaska salinity field structure, freshwater pathways, and controlling mechanisms. *Progress in Oceanography*, 229, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103373>
- Ross, F. W. R., Boyd, P. W., & Filbee-Dexter, K. (2023). Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885, 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Seibel, B. A. (2024). On the validity of using the Metabolic Index to predict the responses of marine fishes to climate change. *Encyclopedia of Fish Physiology*, 3, 549–558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90801-6.00167-1>
- Sundararaman, H. K., & Shanmugam, P. (2024). Estimates of the global ocean surface dissolved oxygen and macronutrients from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114243>
- USEPA. (2014). *Harmful algal blooms: Impacts on aquatic ecosystems*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>
- Wang, Y.-S., & Gu, J.-D. (2021). Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystems to global climate change. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 162, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105248>



## The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Woods, J. S., Veltman, K., & Huijbregts, M. A. J. (2016). Towards a meaningful assessment of marine ecological impacts in life cycle assessment. *Environment International*, 89–90, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.033>

Zarzyczny, K. M., Rius, M., & Williams, S. T. (2024). The ecological and evolutionary consequences of tropicalisation. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(3), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.10.006>

Zhang, T., Liu, H., Lu, Y., Wang, Q., & Loh, Y. C. (2024). Impact of climate change on coastal ecosystem and outdoor activities: A comparative analysis among four largest coastline covering countries. *Environmental Research*, 250, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118405>

Zucca, C., Middleton, N., Kang, U., & Liniger, H. (2021). Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. *Catena*, 207, 105669. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669>

## Poglavlje 2. Utjecaj akvakulture na okoliš iz perspektive globalnog zatopljenja

**prof. dr. sc. Vlasta Bartulović**

**izv. prof. dr. sc. Tatjana Dobrosravić**

**Sveučilište u Dubrovniku**

### Uvod

Suočeni s klimatskim promjenama, utjecaj akvakulture na okoliš sve je veći problem jer industrija doprinosi emisijama stakleničkih plinova, uništavanju staništa i iscrpljivanju resursa. Emisije stakleničkih plinova, uključujući ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), dušikov oksid (N<sub>2</sub>O) i fluorirane plinove, značajno doprinose globalnom zatopljenju zadržavanjem topline u Zemljinj atmosferi. Dok CO<sub>2</sub> često zauzima središnje mjesto, CH<sub>4</sub> je vrlo snažan staklenički plin čije su povećane emisije uzrokovane ljudskim aktivnostima kao što su krčenje šuma, rudarstvo, sagorijevanje biomase i industrijski procesi (Wróbel i sur., 2023). Međuvladin panel o klimatskim promjenama (IPCC) naglasio je da je ljudski utjecaj na klimatske promjene neosporan, a industrijalizacija i urbanizacija dovode do rekordnih emisija stakleničkih plinova. Prometni, energetske i poljoprivredni sektori i dalje znatno doprinose klimatskim promjenama, utječući na vremenske obrasce, razinu mora i biološku raznolikost.

Iako je globalna akvakulturna industrija ključna za sigurnost hrane, ona je i značajan izvor emisija stakleničkih plinova. Energetske intenzivne operacije, prenamjena zemljišta, proizvodnja hrane za životinje i gospodarenje otpadom pridonose ugljičnom otisku (MacLeod i sur., 2019). Mnogi akvakulturni objekti se oslanjaju na električnu energiju iz fosilnih goriva, što povećava emisije CO<sub>2</sub>, posebno u regijama u kojima ugljen, nafta i prirodni plin dominiraju proizvodnjom energije (Bujas i sur., 2022). Osim toga, brzo širenje industrije dovelo je do prenamjene staništa, posebno u ekološki osjetljivim područjima kao što su mangrove i močvare, što je pridonijelo gubitku biološke raznolikosti i degradaciji ekosustava (Barbier i sur., 2011).

Jedan od najvećih učinaka akvakulture na okoliš je proizvodnja hrane za životinje, koja čini do 90 % emisija stakleničkih plinova u uzgoju ribe (FAO, 2022). Uzgoj hrane za životinje, uključujući riblje brašno i biljne sastojke, zahtijeva puno zemlje, vode i energije, što dodatno pogoršava ekološke probleme. Osim toga, akvakultura stvara znatan otpad, uključujući nepojedenu hranu, izmet, nusproizvode metabolizma i kemijske ostatke, a sve to može utjecati na kvalitetu vode i poremetiti vodene ekosustave (Wu, 1995; Dalsgaard i Krause-Jensen, 2006; Holmer i sur., 2008). Opseg tih utjecaja varira ovisno o lokaciji farme, uzgojenim vrstama, gustoći populacije i učinkovitosti hrane. Budući da globalna potražnja za morskim plodovima i dalje raste, hitan je izazov uskladiti rast akvakulture s ekološkom održivošću. Održive prakse u korištenju energije, upravljanju zemljištem,

proizvodnji hrane za životinje i obradi otpada ključne su za smanjenje ugljičnog otiska industrije i osiguravanje dugoročne održivosti okoliša.

## 1. Staklenički plinovi i ugljični otisak

Emisije stakleničkih plinova (GHG) značajno utječu na Zemljinu atmosferu zadržavanjem topline. Ti plinovi uključuju ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), dušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) i fluorirane plinove. Iako se često raspravlja o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  također igra ključnu ulogu u globalnom zatopljenju. Antropogene aktivnosti poput prenamjene močvarnih područja, odlaganja otpada, izgradnje brana, sagorijevanja biomase, krčenja šuma, rudarstva te industrije plina i ugljena drastično su povećale emisije  $\text{CH}_4$ . Unatoč kraćem vijeku trajanja u atmosferi,  $\text{CH}_4$  je znatno učinkovitiji apsorber topline od  $\text{CO}_2$  (Program Ujedinjenih naroda za okoliš, 2022). Međuvladin panel o klimatskim promjenama (IPCC) navodi da je "ljudski utjecaj na klimatski sustav jasan, a nedavne antropogene emisije stakleničkih plinova najveće su u povijesti". Ljudske su aktivnosti od industrijske revolucije značajno povećale koncentracije ovih plinova, što je dovelo do porasta globalnih temperatura i učinaka klimatskih promjena. Brza industrijalizacija i urbanizacija mnogih regija dodatno su pogoršale razine emisija. Prometni sektor, proizvodnja energije i industrijski procesi značajno doprinose emisijama  $\text{CO}_2$ . Osim toga, poljoprivredni sektor, uključujući blago i rižina polja, značajan je izvor emisija  $\text{CH}_4$  i  $\text{N}_2\text{O}$ . Te emisije imaju dalekosežne posljedice, utječući na vremenske obrasce, razinu mora i biološku raznolikost. Globalna industrija akvakulture, iako pruža održivu alternativu ulovu divlje ribe, značajno doprinosi emisijama stakleničkih plinova. Energetski intenzivne operacije, promjene u korištenju zemljišta, proizvodnja hrane za životinje i gospodarenje otpadom doprinose ugljičnom otisku akvakulture (MacLeod i sur., 2019).

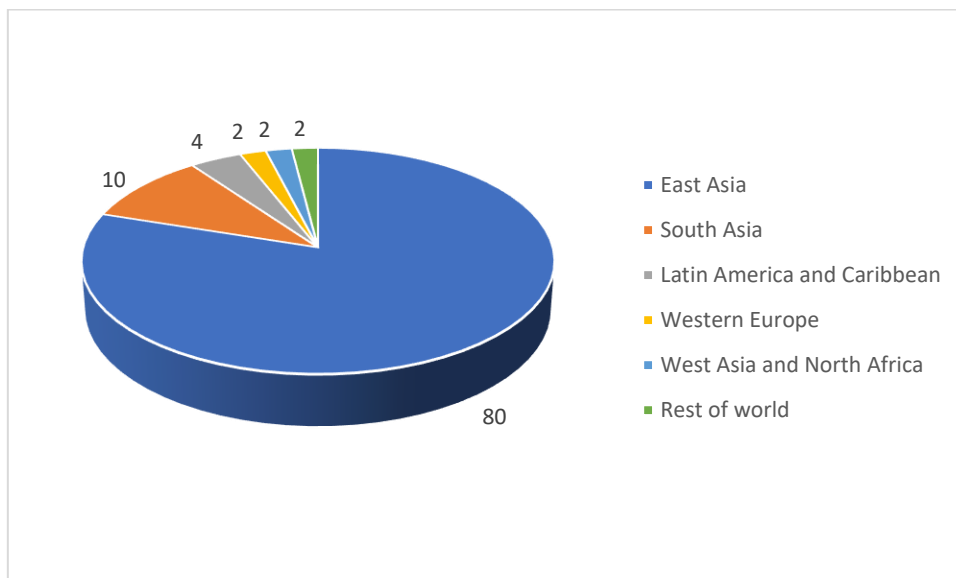
### 1.1. Izvori emisija stakleničkih plinova u kontekstu ekspanzije akvakulture

Akvakultura je u posljednjih nekoliko desetljeća doživjela brz rast i postala značajan čimbenik u globalnoj proizvodnji hrane. Kako potražnja za proizvodima iz mora raste, akvakultura je postala održivija alternativa tradicionalnom stočarstvu. Međutim, širenje akvakulture donosi i ekološke izazove, uključujući emisije stakleničkih plinova (GHG), uglavnom dušikovih oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ) i ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), koji potječu iz stočne hrane, poljoprivredne potrošnje energije, gnojiva i metabolizma životinja (MacLeod i dr., 2019).

Anaerobni uvjeti u ribnjacima potiču stvaranje  $\text{CH}_4$  zbog razgradnje organske tvari u okruženjima s nedostatkom kisika (Pu i dr., 2022). Nadalje, emisije  $\text{N}_2\text{O}$  povezane su s mikrobnom aktivnošću u okruženjima bogatima dušikom, poput onih uzrokovanih prekomjernom primjenom gnojiva ili stočne hrane (Bano i dr., 2024).

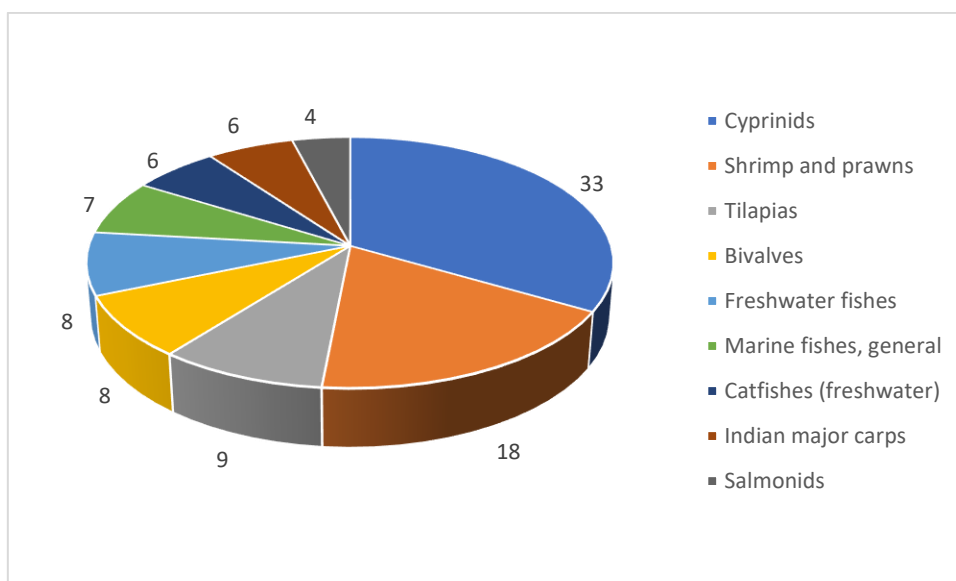
MacLeod i dr. (2019) proučavali su emisije stakleničkih plinova globalne akvakulture, složenog sektora koji obuhvaća različite vrste uzgajane u raznolikim sustavima i okruženjima. Analiza se usredotočuje na glavne skupine uzgajanih vodenih vrsta, isključujući morsko bilje. Kina je najveći svjetski proizvođač i potrošač vodenih proizvoda, a njezin sektor akvakulture igra ključnu ulogu u osiguravanju globalne prehrane sigurnosti (FAO, 2020). Ribarski sektor u Indoneziji bilježi značajan rast u 2023., pridonoseći oko 3,2% bruto domaćem proizvodu (BDP) zemlje (Sulistijowati

i dr., 2023). Sveukupno, istočna i južna Azija najveći su svjetski proizvođači stakleničkih plinova, čineći 90% ukupne proizvodnje (Slika 2.1).



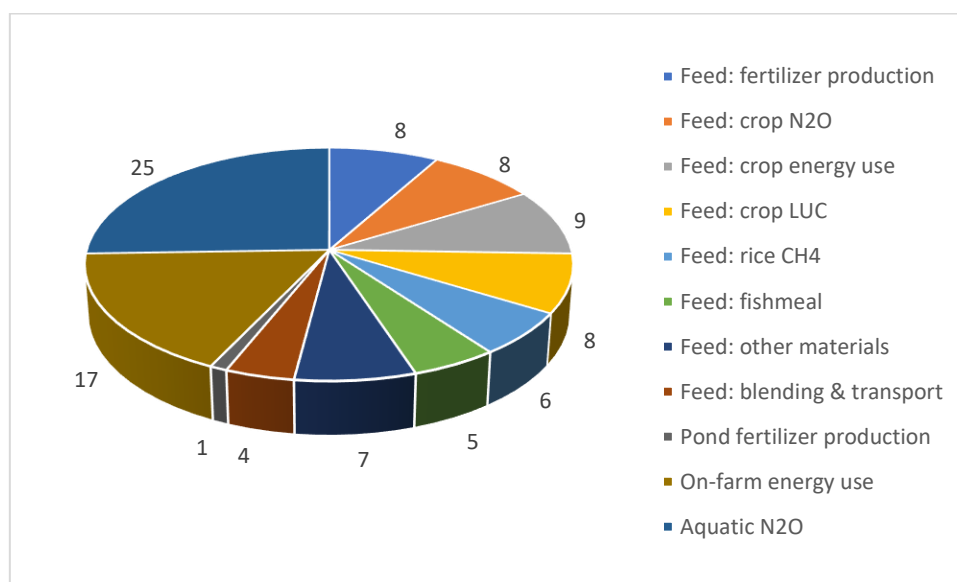
Slika 2.1. Postotni udio ukupnih emisija stakleničkih plinova po regijama (MacLeod i sur., 2019)

Kada se analiziraju podaci za različite vrste, postaje jasno da proizvodnja ciprinida čini najveći udio u emisijama stakleničkih plinova od 33%, a slijedi akvakultura kozica s 18%. Posebno su intenzivni ribnjaci za kozice imali veću produktivnost i uzrokovali su značajne utjecaje na okoliš, posebno u obalnim regijama, jer proizvode velike količine metana zbog anaerobnih uvjeta koji često prevladavaju na muljevitom dnu ribnjaka (Slika 2.2).



Slika 2.2. Postotni udio u ukupnim emisijama stakleničkih plinova po skupinama vrsta. (MacLeod i sur., 2019)

Nakon razmatranja različitih plinova i njihovih izvora u akvakulturi, najveći utjecaj ima proizvodnja hrane za vodene životinje s 55 % svih stakleničkih plinova. Značajan udio imaju i potrošnja energije te  $N_2O$  u vodi (Slika 2.3).



Slika 2.3. Postotni udio emisija stakleničkih plinova prema kategoriji izvora (MacLeod i sur., 2019)

## 1.2. Glavni izvori stakleničkih plinova

$N_2O$  se uglavnom proizvodi mikrobnom pretvorbom dušika u tlu tijekom uzgoja usjeva, ali i mikrobnom pretvorbom dušičnih spojeva iz hrane za životinje i gnojiva u ribnjacima (MacLeod i sur., 2019). IPCC (2007) je izvijestio o povećanim koncentracijama  $N_2O$  i  $CH_4$  od industrijskih vremena, što je zabrinjavajuće jer oba plina, iako prisutna u nižim koncentracijama od ugljičnog dioksida ( $CO_2$ ), imaju 298 ( $N_2O$ ) i 25 ( $CH_4$ ) puta veći potencijal globalnog zagrijavanja od  $CO_2$  tijekom 100-godišnjeg razdoblja. Brzina stvaranja  $N_2O$  određena je nizom fizikalno-kemijskih čimbenika kao što su temperatura, salinitet i pH, koji se mogu mijenjati sezonski. Povećane emisije  $N_2O$  iz akvakulture zabilježene su u sustavima uzgoja ribe visoke gustoće, posebno u Aziji, gdje je širenje akvakulture najznačajnije (FAO, 2020). Studije pokazuju da čak i mala akvakultura može doprinijeti emisijama  $N_2O$  usporedivim s onima iz poljoprivrednih djelatnosti (Rahman i sur., 2022).

$CO_2$  se emitira potrošnjom energije prije rada (uglavnom povezanom s proizvodnjom hrane za životinje i gnojiva), potrošnjom energije tijekom rada (npr. crpljenje vode, potrošnja električne energije, upotreba drugih goriva) te distribucijom i preradom nakon rada. Emisije  $CO_2$  također su posljedica promjena u nadzemnim i podzemnim zalihama ugljika uzrokovanih korištenjem i prenamjenom zemljišta (prenamjena travnjaka u poljoprivredno zemljište).  $CH_4$ , koji se uglavnom stvara anaerobnom razgradnjom organske tvari u uzgoju poplavljenog riža, također se može nastati gospodarenjem otpadom iz ribogojilišta. (MacLeod, 2019). Ribogojilišta stvaraju organski otpad, uključujući nepojedenu hranu, riblji izmet i druge nusproizvode. Kada se ti materijali razgrađuju u

anaerobnom okruženju, kao što su sedimenti ili lagune otpada kojima se loše gospodari, oslobađa se metan ( $\text{CH}_4$ ) (Pu i sur., 2022).

## 2. Potrošnja energije i održivost

Ugljični otisak operacija u akvakulturi izravno je povezan s korištenim izvorima energije. U mnogim regijama akvakultura se oslanja na električnu energiju iz fosilnih goriva, koja oslobađa značajne količine  $\text{CO}_2$  u atmosferu. Intenzitet ugljika u proizvodnji električne energije varira ovisno o kombinaciji izvora energije određene regije. U područjima u kojima se električna energija pretežno proizvodi iz ugljena, nafte ili prirodnog plina, ugljični otisak operacija akvakulture može biti znatan. Upotreba fosilnih goriva za proizvodnju energije u akvakulturi izravno pridonosi emisijama stakleničkih plinova. Emisije ugljika zbog upotrebe energije u akvakulturi mogu biti znatne, posebno za velike, energetske intenzivne operacije (Li, H. i sur., 2024).

### 2.1. Izvori energije i njihov utjecaj na okoliš

Unatoč važnosti akvakulture za proizvodnju hrane, izražena je zabrinutost zbog njezina širenja (Naylor i sur., 2000). Neki od ekoloških problema povezanih s akvakulturom su proizvodnja hrane za životinje i ispuštanje otpadnih voda bogatih hranjivim tvarima u okoliš zbog metabolizma životinja (Thomas i sur., 2021). Ekološka održivost proizvoda, procesa ili usluga često se procjenjuje pomoću procjene životnog ciklusa (LCA), što je metodologija definirana normama ISO 14040 i 14044 (ISO, 2006a, 2006b) kako bi se kvantificirao potencijalni utjecaj na ekosustave, ljudsko zdravlje i prirodne resurse uzrokovan proizvodima i sustavima tijekom cijelog njihova životnog ciklusa (Cucurachi i sur., 2019). Korištenje energije u akvakulturi ključno je za održavanje uvjeta potrebnih za rast uzgajanih vrsta, kao što su cirkulacija vode, prozračivanje, regulacija temperature i hranjenje (Tablica 2.1).

Tablica 2.1. Potrošnja energije u različitim fazama operacija u akvakulturi

| Radna operacija u akvakulturi              | Energetski zahtjevi                                              |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Mrijestilišta i rasadnici                  | kontrola temperature, rasvjeta i cirkulacija vode.               |
| Sustavi ribnjaka i spremnika               | Prozračivanje, pumpanje i filtracija                             |
| Recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) | Obrada vode i regulacija temperature                             |
| Kavezni i offshore sustavi                 | Prijevoz brodom, sustavi hranjenja i izlov                       |
| Proizvodnja i prerada hrane za životinje   | Nabava, proizvodnja i transport energetski intenzivnih sastojaka |

Međutim, ove potrebe za energijom, posebno kada se napajaju fosilnim gorivima, doprinose emisijama ugljika koje pogoršavaju globalno zatopljenje. Kako se industrija nastavlja širiti, razumijevanje i ublažavanje utjecaja akvakulture na okoliš povezanih s energijom ključni su za osiguravanje njezine dugoročne održivosti. Da bi se postigla održivost u akvakulturi, ključno je uravnotežiti utjecaje na okoliš s potrošnjom energije. Integracijom obnovljivih izvora energije u djelatnosti akvakulture mogu se znatno smanjiti emisije stakleničkih plinova (Tablica 2.2).

Tablica 2.2. Primarni izvori energije u akvakulturi

| Izvori energije                               | Iskorišten                                                                                         |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fosilna goriva (dizel, ugljen, prirodni plin) | generatori, transportni i proizvodni pogoni.                                                       |
| Struja                                        | Prvenstveno iz neobnovljivih izvora, napajanje pumpi za vodu, sustavi za prozračivanje i hlađenje. |

Odabir uzgojnog sustava uzgoja i na kraju odabir vrsta s nižim zahtjevima u pogledu kvalitete hrane i vode može smanjiti utjecaj na okoliš i korištenje energije. Energetski troškovi proizvodnje ne uključuju samo pitanja održivosti i učinkovitosti resursa ekosustava i iscrpljivanja neobnovljivih resursa, već i potencijalne troškove za buduća društva kroz promjene okoliša uzrokovane onečišćenjem i globalnim klimatskim promjenama (FAO, 2022.; Parker i sur., 2018).

## 2.2. Energetski intenzivne djelatnosti u akvakulturi

Akvakultura je energetski vrlo intenzivna industrija u kojoj različite operacije zahtijevaju značajne količine energije kako bi se stvorili optimalni uvjeti za vrste koje se uzgajaju. Te operacije uključuju cirkulaciju vode, prozračivanje, kontrolu temperature i sustave hranjenja, a sve je to potrebno za promicanje rasta i zdravlja vodenih organizama. Potrošnja energije povezana s tim aktivnostima varira ovisno o opsegu operacije i vrsti koja se uzgaja.

**1. Cirkulacija i prozračivanje vode.** Održavanje odgovarajuće razine kisika u objektima akvakulture ključno je za zdravlje i opstanak riba i školjkaša. Sustavi za prozračivanje obično se koriste za povećanje razine kisika u vodi, posebno u objektima intenzivne akvakulture gdje se veliki broj organizama uzgaja u zatvorenom prostoru. Ovi sustavi zahtijevaju značajne količine energije, posebno u velikim operacijama. Sustavi cirkulacije vode također se koriste kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela kisika, hranjivih tvari i otpadnih tvari u vodi, čime se dodatno povećavaju energetske potrebe (Tacon i Metian, 2009).

**2. Kontrola temperature.** Temperatura igra važnu ulogu u rastu i metabolizmu vodenih organizama. U nekim regijama radne operacije u akvakulturi moraju regulirati temperaturu vode kako bi se stvorili optimalni uvjeti za vrste koje se uzgajaju. To se posebno odnosi na hladniju klimu ili kod uzgoja tropskih vrsta u umjerenim regijama. Regulacija temperature često zahtijeva energetski intenzivne sustave kao što su grijači, hladnjaci i izmjenjivači topline. Ovi sustavi su važni kako bi se osiguralo da voda ostane u idealnom temperaturnom rasponu za rast i reprodukciju, ali također doprinose visokoj potrošnji energije (Boyd i McNevin, 2015).

**3. Sustavi hranjenja.** Automatizirani sustavi hranjenja obično se koriste u akvakulturi kako bi se optimizirala učinkovitost hranjenja i smanjio otpad. Ovi sustavi se napajaju električnom energijom i koriste se za kontroliranu distribuciju hrane velikom broju riba ili školjkaša. Iako automatizirani sustavi hranjenja mogu poboljšati konverziju hrane i ukupnu produktivnost operacija akvakulture, oni također doprinose energetskim zahtjevima operacije (Matulić i sur., 2020).

### 3. Prenamjena zemljišta i promjena staništa

Budući da globalna potražnja za ribom i morskim plodovima i dalje raste, usklađivanje rasta akvakulture s ekološkom održivošću velik je izazov. Brzo širenje akvakulture dovelo je do znatnih promjena u korištenju zemljišta i promjeni staništa, što je posebno utjecalo na ekološki vrijedne ekosustave kao što su mangrove, močvare i obalna područja. Te promjene pridonose gubitku biološke raznolikosti, emisijama ugljika i ukupnoj degradaciji ekosustava, što izaziva zabrinutost u pogledu dugoročne održivosti akvakulture (Barbier i sur., 2011).

#### *Uništavanje mangrova i emisije ugljika*

Gubitak ili degradacija staništa, posebno obalnih, kao što su mangrove i druga močvarna područja (livade morskih cvjetnica, slane močvare, obalne lagune, estuariji) jedan je od glavnih štetnih učinaka akvakulture (Wu, 1995; Dev, 1998; Naylor i sur., 2000; Páez-Osuna 2001; Ruiz i sur. 2001; Pérez i sur., 2008). Šume mangrova, koje su ključne za obalne ekosustave, najvažniji su izvor organske tvari u tim okolišima (Tidwell i Allan, 2001). Također služe kao kritična staništa za uzgoj brojnih ekonomski važnih vodenih vrsta, kao i područja za gniježđenje i odmor za razne druge skupine (Páez-Osuna, 2005). Osim toga, mangrove doprinose zaštiti obale zadržavanjem sedimenata, zagađivača, dušika i ugljika te smanjenjem erozije (Alongi, 2002; Walters i sur., 2008). Međutim, stopa krčenja šuma mangrova procjenjuje se na 1 – 2 % godišnje, pri čemu je akvakultura kozica i riba glavni uzrok gubitka milijuna hektara šuma mangrova u zemljama kao što su Tajland, Indonezija, Ekvador i Madagaskar (Naylor i sur., 2000; Harper i sur., 2007). Studije provedene u morskim kavezima uzgajalištima na obali Sredozemnog mora izvijestile su o uništavanju/razgradnji livada *Posidonia oceanica* kao posljedice velikog opterećenja organskim proizvodima i hranjivim tvarima zbog aktivnosti uzgoja ribe. Pretvaranje šuma mangrova u farme kozica (Dev 1998; Choo 2001; Páez-Osuna 2001) uglavnom je uzrokovao gubitak hranilišta, rasadnika, skloništa i mrijestilišta za širok raspon morskih i kopnenih životinja (Ruiz i sur. 2001; Pérez et al. 2008) i gubitak prirodne zaštite od poplava, oluja i uragana (Dev 1998; Choo 2001; Páez-Osuna 2001).

Uništavanje mangrova za akvakulturu ne samo da im oduzima sposobnost skladištenja ugljika, već i oslobađa pohranjeni ugljik iz tla u atmosferu. Prema Alongiju (2015), pretvaranje šuma mangrova u uzgajališta kozica dovodi do značajnog povećanja emisije ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>). Budući da su mangrove među ekosustavima s najvećom gustoćom ugljika na planetu i mogu pohraniti do pet puta više ugljika po hektaru od tropskih šuma, njihov gubitak kritičan je ekološki problem (Barbier i sur., 2011). Osim gubitka ugljika, degradacija obalnih močvara povećava osjetljivost na eroziju i poplave, slabi otpornost obale i čini lokalne zajednice ranjivijima na utjecaje klimatskih promjena (Barbier i sur., 2011).

#### *Prenamjena močvarnih područja i poljoprivrednog zemljišta*

Širenje akvakulture na kopnu dovelo je i do znatnih promjena u korištenju zemljišta, posebno prenamjenom poljoprivrednog zemljišta i močvarnih područja u akvakultura. Potaknuta ekonomskim prednostima akvakulture, koja često donosi veće financijske povrate od tradicionalne poljoprivrede, ova pretvorba sa sobom donosi nekoliko ekoloških problema (Ahmed i Thompson, 2019). Jedan od glavnih problema je uništavanje ekosustava jer se močvare važne za filtriranje vode, kontrolu poplava i biološku raznolikost isušuju kako bi se napravilo mjesta za ribnjake u akvakulturi.

To dovodi do gubitka biološke raznolikosti i narušava sposobnost staništa da se nosi s promjenama okoliša.

Rahman i sur. (2022) pokazuju da prenamjena poljoprivrednog zemljišta u akvakultura dovodi do znatne i često nepovratne ekološke štete, naglašavajući potrebu za održivim praksama korištenja zemljišta. Osim toga, intenzivna akvakultura može dovesti do nakupljanja organskog otpada, kemikalija i viška hranjivih tvari u tlu i vodi, što dovodi do eutrofikacije. Ovaj proces, karakteriziran prekomjernom količinom hranjivih tvari, dovodi do cvjetanja algi i iscrpljivanja kisika te ima ozbiljne utjecaje na vodene ekosustave (Boyd i sur., 2020).

### ***Fragmentacija staništa i gubitak bioraznolikosti***

Širenje akvakulture pridonijelo je fragmentaciji staništa, što narušava ekološku povezanost i otežava vrstama migraciju, razmnožavanje i pristup resursima hrane. Ta rascjepkanost može dovesti do smanjenja populacija i gubitka biološke raznolikosti. Uvođenje stranih vrsta radi uzgoja pogoršava ove učinke jer se natječu s autohtonim vrstama ili im znatno smanjuju populacije, dodatno destabilizirajući ekosustave (Chavez i sur., 2020).

Nedavne studije pokazuju dubok utjecaj fragmentacije staništa na biološku raznolikost (Marrone i sur., 2023). Prenamjena poljoprivrednog zemljišta u područja akvakulture dovela je do trajnih ekoloških promjena, naglašavajući važnost održivih praksi u takvim tranzicijama (Rahman i sur., 2022). Uništavanje staništa dovodi do smanjenja veličine populacije i fragmentacije raspona vrsta, remeti kretanje jedinki između stanišnih dijelova i smanjuje njihove šanse za preživljavanje (Haddad i sur., 2015).

## **4. Proizvodnja hrane za životinje i korištenje resursa**

Proizvodnja hrane za životinje za akvakulturu važan je aspekt sektora, ali ima znatan utjecaj na okoliš. Uzgoj sastojaka hrane za životinje kao što su riblje brašno i biljni sastojci zahtijevaju znatne prirodne resurse kao što su zemlja, voda i energija. To pridonosi emisijama stakleničkih plinova i uništavanju okoliša. Procjenjuje se da se do 90 % emisija stakleničkih plinova iz ribogojilišta može pripisati proizvodnji hrane za životinje u akvakulturi (FAO, 2022). Kako se potražnja za proizvodima akvakulture povećava, održive prakse za proizvodnju hrane za životinje ključne su za smanjenje utjecaja na okoliš i osiguravanje dugoročne održivosti industrije.

### **4.1. Hrana za akvakulturu i alternativni izvori**

U akvakulturi se koriste različite vrste hrane kako bi se zadovoljile prehrambene potrebe uzgojene ribe i morskih proizvoda te kako bi se osigurao rast i zdravlje životinja. Tradicionalno, riblje brašno je glavna komponenta hrane za akvakulturu. Riblje brašno dobiva se od male pelagične ribe kao što su incuni i srdele. Međutim, zbog zabrinutosti zbog prekomjernog izlova, iscrpljivanja resursa i održivosti morskih ekosustava, povećao se interes za alternativne izvore hrane za životinje (Tacon i Metian, 2009).

Kao odgovor na ove izazove, industrija istražuje alternativne sastojke hrane. Biljni proteini poput soje, kukuruza i pšenice neke su od najčešće istraženih opcija. Ti se sastojci smatraju potencijalnim zamjenama za riblje brašno i upotrebljavaju se u hrani za akvakulturu kako bi se smanjila ovisnost o

morskim resursima (Duarte i sur., 2020; O'Flynn i sur., 2021). Osim toga, proteini na bazi kukaca, npr. od vojničkih muha i brašnara, nedavno su se pojavili kao obećavajuća alternativa. Kukci se mogu uzgajati na organskom otpadu i nude potencijalno rješenje za smanjenje potrebe za prenamjenom zemljišta i minimiziranje ekološkog utjecaja (Freda i sur., 2022).

Općenito, potraga za alternativnim sastojcima hrane za životinje odražava rastuću svijest o potrebi usklađivanja uzgoja ribe i održivosti. Ova konverzija izvora hrane za životinje ima za cilj smanjiti ovisnost o morskim resursima uz održavanje nutritivne kvalitete hrane za uzgojene vrste.

## 4.2. Utjecaj proizvodnje hrane za akvakulturu na okoliš

### *Ekološki utjecaj hrane za životinje bilnog podrijetla*

Zamjena ribljeg brašna biljnim sastojcima kao što su soja i kukuruz smanjuje pritisak na morske ekosustave, ali stvara nove ekološke probleme (Tacon i Metian, 2009). Sve veća potražnja za ovim alternativama dovela je do velike prenamjene zemljišta, posebno u tropskim regijama, kako bi se zadovoljila rastuća potražnja za poljoprivrednim resursima (Fargione i sur., 2023.). Ta promjena u korištenju zemljišta dovela je do znatnih učinaka na okoliš, uključujući krčenje šuma, gubitak staništa i smanjenje biološke raznolikosti. Tropske prašume posebno su pogođene jer se krče velike površine za uzgoj usjeva poput soje i kukuruza, koji su važni za proizvodnju stočne hrane (Fargione i sur., 2023).

### *Učinci na klimatske promjene i emisije stakleničkih plinova*

Osim prenamjene zemljišta, proizvodnjom biljne hrane povećava se utjecaj na okoliš povećanjem emisija stakleničkih plinova. Prenamjena šuma u poljoprivredno zemljište za proizvodnju stočne hrane znatno doprinosi emisijama ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>). To se događa ne samo izravno gubitkom skladištenja ugljika u šumama, već i energetske intenzivnim procesima koji su uključeni u krčenje i transport (Soussana i sur., 2021). Osim toga, upotreba sintetičkih gnojiva i pesticida u uzgoju usjeva dovodi do oslobađanja dušikovog oksida (N<sub>2</sub>O), snažnog stakleničkog plina koji pogoršava globalno zagrijavanje (Pardoe i sur., 2022). Te emisije destabiliziraju lokalnu i regionalnu klimu i čine industriju akvakulture ranjivijom na izazove povezane s klimom.

### *Degradacija zemljišta, potrošnja vode i poljoprivredna bioraznolikost*

Kao ključna komponenta različite hrane u akvakulturi, soja pojačava ekološke probleme, posebno u pogledu degradacije tla, prekomjerne potrošnje vode i gubitka poljoprivredne bioraznolikosti (Magrin i sur., 2020). Brzo širenje monokultura soje dovelo je do zabrinutosti zbog erozije tla, otjecanja hranjivih tvari i povećane osjetljivosti na štetočine i bolesti. Ovi problemi često zahtijevaju povećanu upotrebu kemijskih gnojiva i pesticida, što dodatno nanosi štetu okolišu. Takve prakse pridonose onečišćenju vode i eutrofikaciji, oštećujući slatkovodne i morske ekosustave (Pardoe i sur., 2022). Osim toga, uništavanje vrijednih ekosustava kao što su močvare i šume za poljoprivredu, remeti lokalne cikluse ugljika, smanjuje sposobnost staništa da se prilagodi klimatskim promjenama i povećava osjetljivost na ekstremne vremenske prilike kao što su poplave i suše (Fargione i sur., 2023).

### *Ugljični otisak i potrošnja energije*

Osim promjena u korištenju zemljišta, veliki poljoprivredni procesi za proizvodnju hrane za životinje važan su izvor emisija stakleničkih plinova (Soussana i sur., 2021). Energetski intenzivni procesi povezani s prenamjenom zemljišta, kao i velika potražnja za gnojivima i prijevozom, doprinose

značajnom ugljičnom otisku. Osim toga, prerada biljnih materijala u hranu za ribe često uključuje energetske intenzivne procese, što pogoršava utjecaj na okoliš. Ovaj je problem posebno ozbiljan kada su fosilna goriva uključena u proizvodne procese. Kao rezultat toga, ovi ekološki izazovi naglašavaju zabrinutost za dugoročnu održivost biljnih alternativa hrani za životinje zbog suočavanja s globalnim klimatskim promjenama.

#### 4.3. Odabir hrane za životinje i prehrana u akvakulturi

##### *Čimbenici koji utječu na odabir hrane za životinje*

Odabir hrane za ribe i rakove iz uzgoja ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući prehrambene navike vrsta (biljojedi, svejedi ili mesojedi), tržišnu vrijednost vrsta i sustav uzgoja koji se koristi. Sustav uzgoja, bilo da se radi o zemljanom ribnjaku, ograđenom prostoru ili kavezu, također utječe na izbor hrane. Intenzivni sustavi zahtijevaju posebno formulanu hranu za optimizaciju rasta i stope konverzije hrane (FCR), dok se opsežni sustavi mogu više osloniti na organizme iz prirode (Tacon i sur., 2013).

##### *Ekonomska i okolišna razmatranja pri odabiru hrane za životinje*

Drugi ključni čimbenik je dostupnost komercijalno formulirane hrane. Ako je nedostupna ili neprikladna, uzgajivači se mogu okrenuti hrani za životinje domaće proizvodnje proizvedenoj od lokalnih sastojaka kao što su riba niske kvalitete ili poljoprivredni nusproizvodi. Financijska sredstva, kao što su troškovi hrane, skladištenja i rada, igraju važnu ulogu u ovom procesu donošenja odluka (Tacon i sur., 2013). Loše strategije, poput prekomjernog hranjenja, mogu dovesti do rasipanja hranjivih tvari i onečišćenja okoliša. Stoga upravljanje hranom za životinje također mora uspostaviti ravnotežu između ekonomske učinkovitosti i ekološke održivosti (White, 2013).

##### *Kvaliteta i učinkovitost hrane za životinje*

Važna stavka u akvakulturi je zadovoljavanje prehrambenih potreba riba odgovarajućom racionalizacijom hrane koja optimizira rast i FCR. Potrebe za energijom i hranjivim tvarima ribljih vrsta mogu kolebati svakodnevno, sezonski i od jedinke do jedinke. Neuravnotežena prehrana, nedovoljno ili prekomjerno hranjenje mogu smanjiti učinkovitost proizvodnje i doprinijeti degradaciji okoliša, posebno u uzgoju u kavezima (Bureau, et al., 2006; Thorpe i Cho, 1995). Kako bi se rasipanje svelo na najmanju moguću mjeru i postigla ekonomska i ekološka održivost, ključne su odgovarajuće strategije upravljanja hranom za životinje (Talbot, Corneillie i Korsøen, 1999; Cho i Bureau, 1998).

##### *Prelov*

Iskorištavanje divljih resursa i biološke raznolikosti za proizvodnju hrane i opskrbu mladih jedinka i matičnog stoka, može prouzročiti znatnu štetu vodenim ekosustavima (Dev, 1998.; Choo, 2001; Páez-Osuna, 2001). Riba iz prirode, niske komercijalne vrijednosti, kao što su japanski incun i lokarda, često se koriste kao hrana za karnivorne ribe ili kao dopunska hrana za vrste kao što su kozice, tilapija i milkfish. Ta praksa stvara dodatni pritisak na već prekomjerno izlovljene stokove divlje ribe. Izlov divlje ulovljene ribe kao što su jegulja, kirnje i tuna dodatno pridonosi iscrpljivanju prirodnih populacija.

Sakupljanje kozica iz prirode i ličinki školjkaša posebno je štetno jer ne samo da prijeti ciljnim vrstama, već ubija i neciljane organizme kao što su druge vrste kozica, makrozooplankton te juvenilne

ribe i školjkaši. Ovaj poremećaj hranidbene mreže utječe na širok raspon organizama, uključujući vodene ptice, gmazove i sisavce, što rezultira povećanom smrtnošću i smanjenim uspjehom razmnožavanja (Choo, 2001). Osim toga, uklanjanje divljih vrsta može dovesti do genetske degradacije autohtonih populacija i uništavanja prirodnih staništa, što rezultira daljnjim poremećajem vodenog ekosustava (Dev, 1998). Ovaj je problem posebno važan za gusto izlovljene vrste i one s niskom reproduktivnom sposobnošću. Sve dok je proizvodnja matičnog stoka u zatočeništvu skupa, kupnja divljih jedinki vjerojatno će se nastaviti i uzrokovati daljnju štetu okolišu (Nash, 2005).

## 5. Zagađenje i zaostale tvari

U akvakulturnim pogonima se mogu proizvesti značajne količine otpada/otpadnih voda koje sadrže različite tvari, kao što su čestice (uglavnom od nepojedene hrane i izmeta), otopljeni metabolički proizvodi (iz izlučivanja škrigama i bubrezima) i različiti oblici kemikalija (npr. terapije, gnojiva, teški metali), s neželjenim posljedicama za okoliš (Wu, 1995; Dev, 1998; Pérez-Osunan 2001; Read i Fernandes 2003). Utjecaji na okoliš koji proizlaze iz čestica i otopljenog organskog i anorganskog materijala (Tablica 2.3) posebno su važni jer ti spojevi izravno ulaze u okoliš i utječu i na vodeni stupac i na sediment (Dalsgaard i Krause-Jensen 2006; Holmer i sur., 2007). Opseg tih utjecaja uglavnom ovisi o lokaciji farme, životinjskoj vrsti, vrsti usjeva, gustoći naseljenosti, probavljivosti hrane za životinje i drugim čimbenicima uzgoja kao što su prehrabne prakse i status bolesti (Wu, 1995).

Tablica 2.3. Pokretači, pritisci, stanja, učinci i odgovori na hipotetski razvoj akvakulture (Serpa i Duarte, 2008.)

| Pokretač   | Pritisak                                                 | Stanje                                                            | Učinak                                                            | Odgovor                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Uzgoj riba | Povećani tokovi hranjivih tvari                          | Povećani nutrijenti i organska koncentracija tvari                | Povećani fitoplankton biomasa/eutrofikacija                       | Proizvodnja morskih algi za uklanjanje viška hranjivih tvari |
|            | Povećani tokovi organske tvari<br>Smanjena razina kisika | Smanjena razina kisika.<br>Nakupljanje organske tvari u sedimentu | Veća smrtnost bentoskih organizama/smanjena bentoska raznovrsnost | Prozračivanje donjih slojeva                                 |
|            | Povećana količina lijekova                               | Smanjeni protok i povećano vrijeme boravka                        | Povećano taloženje u sedimentu                                    | Preraspodjela na područja s više intenzivne hidrodinamike    |

|  |                          |                  |                                    |                                                       |
|--|--------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  | Oslobađanje ksenobiotika | Biokoncentracija | Povećana smrtnost neciljanih vrsta | Manje intenzivni uzgoj radi redukcije širenja bolesti |
|--|--------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|

Meteorološke (npr. obrasci vjetrova), hidrografske (npr. batimetrija, struje, režim plime i oseke, djelovanje valova, brzine sedimentacije) i geomorfološke značajke lokaliteta akvakulture (Nordvarg i Hakanson 2002; Kalantzi i Karakassis 2006), snažno utječu na sudbinu bilo koje vrste otpada ispuštenog u vodeni stupac.

Otpadne vode iz sustava intenzivne proizvodnje, s velikim unosom hrane, obično imaju veće negativne učinke od otpadnih voda iz poluintenzivnih ili ekstenzivnih sustava s malo ili nimalo dodavanja hrane za životinje (Kautsky i sur. 2000; Pérez-Osuna 2001).

Otpad iz akvakulture, uključujući nepojedenu hranu, riblji izmet i kemijske ostatke, ima značajan utjecaj na okoliš. Višak hranjivih tvari, poput dušika i fosfora, doprinosi onečišćenju vode i eutrofikaciji, što dovodi do iscrpljivanja kisika i štetnog cvjetanja algi. Upotreba kemikalija u akvakulturi može dovesti do otpornosti na antibiotike i poremećaja ekosustava, dok degradacija staništa, kao što je krčenje šuma mangrova, ugrožava biološku raznolikost. Rješavanje ovih izazova zahtijeva održive prakse kao što su poboljšano gospodarenje otpadom i ekološki prihvatljive poljoprivredne tehnike kako bi se smanjili negativni učinci akvakulture na okoliš.

### 5.1. Onečišćenje hranjivim tvarima

Otpad iz akvakulture, posebno nepojedena hrana za životinje i riblje izlučevine, unosi visoke razine dušika i fosfora u okolne vode. Ovo obogaćivanje hranjivim tvarima može dovesti do eutrofikacije, koju karakterizira prekomjerno cvjetanje algi koje iscrpljuje razinu kisika i šteti vodenom životu.

Unos anorganskih spojeva (npr. amonijaka, nitrata, nitrita i fosfata) razgradnjom organske tvari, izlučivanjem životinja i gnojdbom iz ribnjaka također može imati potencijalno opasne učinke na okoliš (Wu, 1995; Dev, 1998; Tovar i sur., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Pearson i Black, 2001; Read i Fernandes, 2003; Biao i Kaijin, 2007; Pérez i sur., 2008). Većina nepoželjnih ekoloških posljedica povezanih s prekomjernom dostupnošću hranjivih tvari iz ispuštanja iz akvakulture povezana je s eutrofikacijom i uključuju, na primjer, hipernutritivaciju i iscrpljivanje otopljenog kisika koji uzrokuju pogoršanje kvalitete vode (Tovar i sur., 2000a; Read i Fernandes, 2003). Opterećenje hranjivim tvarima također doprinosi bazenu biljnih hranjivih tvari u vodenim sustavima, potičući rast primarnih proizvođača (Read i Fernandes, 2003; Biao i Kaijin, 2007), pa čak i promjenu strukture i sastava ovih ključnih zajednica.

Ako se obogaćivanje hranjivim tvarima podudara s određenim fizičkim uvjetima i drugim, slabo shvaćenim čimbenicima, može doći do rasta toksičnih vrsta fitoplanktona, što dovodi do stvaranja štetnog cvjetanja algi, HAB (Biao i Kaijin, 2007). Na primjer, izvješća o HAB-u kod *Chattonella marina*, vjerojatno uzrokovana ispuštanjem otpadnih voda s farmi kozica, dokumentirana su duž obale sjeverno od Žutog mora 1993. i 1995. godine (Biao i Kaijin, 2007). Toksično cvjetanje fitoplanktona može proizvesti različite vrste toksina (npr. DSP - trovanje školjkašima u dijareji, PSP



- paralitičko trovanje školjkašima i ASD - amnezijaska bolest školjkaša), koji često uzrokuju trovanje školjkašima i smrtnost bentoske faune i divlje/uzgojene ribe, čime se ugrožava ekonomska održivost aktivnosti akvakulture (Pearson i Black, 2001; Read i Fernandes, 2003; Gyllenhamman i Hakanson, 2005). Iako se čini da potencijal za eutrofikaciju nije vjerojatan za uzgoj u morskim kavezima zbog učinka razrjeđivanja morske vode (Wu, 1995; Pearson i Black, 2001), ne može se isključiti mogućnost lokalizirane eutrofikacije u područjima slabog ispiranja (Wu, 1995; Pearson i Black, 2001). Što se tiče ograničenih područja razmjene, kao što su obalne lagune i estuariji, prekomjerna dostupnost hranjivih tvari može utjecati na produktivnost ekosustava, a u nekim slučajevima i negativno utjecati na samu aktivnost akvakulture (Dev, 1998; Pérez-Osuna, 2001b).

## 5.2. Utjecaji antibiotika i uporabe kemikalija

Upotreba antibiotika i drugih kemikalija u akvakulturi za sprječavanje bolesti može dovesti do ulaska ostataka u okoliš. Te tvari mogu poremetiti lokalne ekosustave i doprinijeti razvoju bakterija otpornih na antibiotike. Istraživanja pokazuju da se zagađivači iz akvakulture brzo raspršuju u rijekama, ali otpadne vode iz ribogojilišta doprinose manje od 1% ukupnih suspendiranih krutih tvari, biološke potrebe za kisikom i fosfora koji se ispuštaju u okoliš. Kemikalije koje se koriste u akvakulturi mogu se kategorizirati kao: 1) dodaci hrani za životinje (npr. vitamini, pigmenti, minerali i hormoni), 2) dezinficijensi (npr. izbjeljivač, malahitno zeleno) i pesticidi (npr. mekušci i ribicidi), 3) vapnenac, 4) metali (npr. antifoulanti) i 5) lijekovi, uključujući antibiotike, anestetike, antiparazitike i cjepiva (Read i Fernandes, 2003) koji se koriste za kontrolu vanjskih i unutarnjih parazita ili mikrobnih infekcija (Costello i sur., 2001).

Upotreba antibiotika u akvakulturi ima nekoliko negativnih učinaka na okoliš. Raširena upotreba antibiotika u akvakulturi može dovesti do razvoja bakterija otpornih na antibiotike, koje mogu prenijeti svoje gene otpornosti na druge bakterije, uključujući one koje uzrokuju bolesti kod ljudi i drugih životinja (Okocha i sur., 2018.). Antibiotici mogu imati toksične učinke na zajednice mikroorganizama u vodenom okolišu, uključujući zajednice algi, koje su ključne za zdravlje vodenih ekosustava (Li i sur., 2024.). Osim toga, antibiotici i njihovi nusproizvodi mogu opstati u prirodnom okruženju zbog svoje teške biorazgradnje, nakupljajući se u sedimentima, vodenim površinama i podzemnim vodama, što dovodi do dugotrajne kontaminacije okoliša. Prisutnost antibiotika u vodenom okolišu može potaknuti ozbiljne promjene u sastavu i strukturi bakterijskih zajednica, utječući na cjelokupno zdravlje i biološku raznolikost vodenih ekosustava (Luthman i sur., 2024). Nadalje, upotreba antibiotika u akvakulturi može dovesti do prisutnosti zaostalih antibiotika u ribi i drugim proizvodima akvakulture, što predstavlja rizik za zdravlje ljudi koji konzumiraju te proizvode. Neselektivna upotreba antibiotika u akvakulturi također može rezultirati poremećajem normalne crijevne flore kod vodenih životinja, što dovodi do negativnih utjecaja na njihovo zdravlje i rast. Štoviše, nakupljanje antibiotika u okolišu može dovesti do razvoja patogena otpornih na antibiotike, koji se mogu proširiti na druge ekosustave i predstavljati prijetnju vodenom i kopnenom životu (Farias i sur., 2024).

Koriste se i drugi biološki proizvodi, kao što su razlagači organske tvari (npr. bakterije i enzimski pripravci) (Gräslund i Bengtsson, 2001). Primjena ovih kemikalija uglavnom ovisi o sustavu kulture. Na primjer, dok poluintenzivne farme kozica zahtijevaju minimalnu upotrebu kemikalija, uglavnom

gnojiva i materijala za vapnenje (Boyd i Massaut 1999; Choo, 2001; Gräslund i Bengtsson, 2001), kako se proizvodnja kozica intenzivira, upravljanje postaje problematičnije, a broj i raznolikost kemijskih spojeva uvelike se povećava (Gräslund i Bengtsson, 2001).

Intenzivna kultura u ribnjaku također zahtijeva veću raznolikost kemikalija u usporedbi s kaveznim sustavima, koji uglavnom koriste dezinficijense, antifoulante i veterinarske lijekove (Kelly i Elberizon, 2001; Read i Fernandes, 2003). Glavni rizici za okoliš povezani s upotrebom kemijskih spojeva odnose se na: i) pogoršanje kvalitete vode, ii) interferenciju na biogeokemijske procese, iii) izravnu toksičnost za divlju faunu i floru, iv) razvoj otpornosti patogenih organizama i v) smanjenje profilaktičke učinkovitosti (Costello i sur., 2001). Nepravilna uporaba kemijskih spojeva također može utjecati na sigurnost proizvoda akvakulture, predstavljajući prijetnju ljudskom zdravlju (Choo, 2001, Islam i sur., 2004).

## Sažetak

Akvakultura igra ključnu ulogu u globalnoj sigurnosti hrane, ali njezino brzo širenje izazvalo je značajnu zabrinutost za okoliš, posebno u doba klimatskih promjena. Industrija je glavni izvor emisija stakleničkih plinova, uništavanja staništa i iscrpljivanja resursa. Ugljični dioksid, metan i dušikov oksid oslobađaju se energetske intenzivnim operacijama, proizvodnjom hrane za životinje i gospodarenjem otpadom. Mnogi objekti akvakulture oslanjaju se na fosilna goriva za električnu energiju, povećavajući emisiju ugljika, dok anaerobni uvjeti u ribnjacima doprinose ispuštanju metana. Osim toga, emisije dušikovog oksida proizlaze iz okruženja bogatog dušikom stvorenog viškom hrane i gnojiva. Brzo širenje akvakulture dovelo je i do raširenih promjena u korištenju zemljišta, posebno u obalnim i močvarnim ekosustavima. Mangrove i druga vitalna staništa očišćena su kako bi se napravio prostor za farme kozica i ribnjake, što je dovelo do gubitka bioraznolikosti, obalne erozije i smanjena sekvenciranja ugljika. Proizvodnja hrane za životinje jedan je od najvećih čimbenika koji doprinosi ekološkom otisku akvakulture i čini većinu emisija. Tradicionalna hrana na bazi ribljeg brašna vrši pritisak na morske resurse, dok biljne alternative, poput soje, doprinose krčenju šuma, degradaciji zemljišta i prekomjernoj upotrebi vode. Proteini na bazi kukaca i drugi novi izvori hrane nude potencijalna rješenja, ali usvajanje velikih razmjera i dalje je ograničeno zbog ekonomskih i logističkih izazova. Drugi veliki problem je stvaranje otpada, jer nepojedena hrana, riblje izlučevine i kemijski ostaci doprinose onečišćenju vode, eutrofikaciji i štetnom cvjetanju algi, što dovodi do iscrpljivanja kisika i neravnoteže ekosustava. Upotreba antibiotika u akvakulturi izaziva zabrinutost zbog otpornosti na antibiotike, koja može utjecati i na vodeni okoliš i na ljudsko zdravlje. Rješavanje ovih izazova zahtijeva pomak prema održivim praksama, uključujući integraciju obnovljive energije, optimizaciju učinkovitosti hrane, usvajanje odgovornih strategija korištenja zemljišta i provedbu učinkovitih rješenja za gospodarenje otpadom. Kako globalna potražnja za morskim proizvodima nastavlja rasti, balansiranje rasta akvakulture s odgovornošću za okoliš ključno je za osiguravanje dugoročne održivosti industrije i minimiziranje njezina ekološkog utjecaja.

## Literatura

Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue revolution and the changing land use pattern in aquaculture development. *Aquaculture Reports*, 14, 100219.

- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331–349.
- Alongi, D. M. (2015). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 56, 1–10.
- Bano, S., Wu, Q., Yu, S., Wang, X., & Zhang, X. (2024). Soil properties drive nitrous oxide accumulation patterns by shaping denitrifying bacteriomes. *Environmental Microbiome*, 19, 94.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.
- Biao, X., & Kaijin, Y. (2007). Shrimp farming in China: Environmental impact and sustainability. *Aquaculture International*, 15(5), 21–39.
- Boyd, C. E., et al. (2020). Environmental assessment and management in aquaculture. *Aquaculture International*, 28(2), 697–716.
- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113–132.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of energy consumption by the fish farming and processing industry in Croatia and the potential for zero-emissions aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bureau, D. P., & Cho, C. Y. (2006). Feeding strategies and diet formulation to reduce waste outputs in aquaculture. *Aquaculture Research*, 37(3), 123–135.
- Chavez, J., et al. (2020). Effects of aquaculture on habitat fragmentation and ecosystem dynamics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 452–465.
- Choo, P. S. (2001). Mangroves, shrimps and aquaculture in Malaysia. *Aquaculture Asia Magazine*, 6(2), 5-7.
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Diet formulation and feeding systems to reduce environmental impact in aquaculture. *Aquaculture Research*, 29(3), 123–135.
- Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., & Tukker, A. (2019). Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth*, 1(3), 292–297.
- Dalsgaard, T., & Krause-Jensen, D. (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture*, 256, 302–310.
- Dev, A. K. (1998) Fake Blue Revolution: Environmental and Socio-Economic Impacts of Shrimp Culture in the Coastal Areas of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 41, 63–88.
- Duarte, T. A., Correia, D. M., & Silva, J. L. (2020). The role of alternative protein sources in sustainable aquaculture: Plant-based proteins. *Aquaculture Research*, 51(4), 1234–1247.
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. FAO.
- Fargione, J., Tilman, D., & Clark, M. (2023). Agricultural expansion and its impact on biodiversity: A global perspective. *Nature Sustainability*, 6(3), 182–190.
- Farias, D. R., Ibarra, R., Estévez, R. A., Tlustý, M. F., Nyberg, O., Troell, M., Avendaño-Herrera, R., & Norden, W. (2024). Towards Sustainable Antibiotic Use in Aquaculture and Antimicrobial Resistance: Participatory Experts' Overview and Recommendations. *Antibiotics*, 13(9), 887.
- Freda, C. G., Smith, M., & Gupta, M. (2022). Insect protein as a sustainable alternative for aquaculture: An environmental review. *Journal of Insect Science*, 22(1), 10–20.
- Gräslund, S., & Bengtsson, B. E. (2001). Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment – A review. *The Science of the Total Environment*, 280(1–3), 93–131.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Diez, J. M., Damschen, E. I., & Holt, R. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on biodiversity. *Nature Communications*, 6, 7926.

- Harper, G. J., Steininger, M. K., Tucker, C. J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007). Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, 34(4), 325–333.
- Holmer, M., Hansen, P. K., Karakassis, I., Borg, J. A., & Schembri, P. J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In M. Holmer, K. Black, C. M. Duarte, N. Marbà, I. Karakassis (eds.), *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.
- Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007). Sediment biogeochemical changes associated with fish farms in coastal Mediterranean regions. *Environmental Pollution*, 118(2), 313–319.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Islam, M. S., Kabir, M. S., Khan, S. I., Ekramullah, M., Nair, G. B., Sack, R. B., & Sack, D. A. (2004). Wastewater-grown duckweed may be safely used as fish feed. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(1), 51–56.
- Kalantzi, I., & Karakassis, I. (2006). Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52(5), 484–493.
- Kautsky, N., Berg, H., Folke, C., Larsson, J., & Troell, M. (2000). Ecological footprint and trophic level impact of aquaculture: Implications for sustainability. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1–12.
- Kelly, L. A., & Elberizon, I. R. (2001). Freshwater finfish cage culture. In K. D. Black (ed.), *Environmental Impacts of Aquaculture* (pp. 1–32). Sheffield Academic Press.
- Li, Z., He, H., Ding, J., Zhang, Z., Leng, Y., Liao, M. & Xiong, W. (2024). Effects of Three Antibiotics on Nitrogen-Cycling Bacteria in Sediment of Aquaculture Water. *Water*, 16(9), 1256.
- Li, H., Liu, H., Zhou, X., Gao, L., Liang, J., Chen, L., Guo, Y., & Liang, S. (2024). Carbon footprint assessment and reduction strategies for aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), n/a.
- Luthman, O., Robb, D. H., F., Jørgensen, P. S., & Troell, M. (2024). Global overview of national regulations for antibiotic use in aquaculture production. *Aquaculture International*, 32, 9253–9270.
- MacLeod, M., Hasan, M. R., Robb, D. H. F. & Mamun-Ur-Rashid, M. (2019). Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626*. Rome, FAO.
- Magrin, G. O., Rojas, S. M., & Tschakert, P. (2020). Soybean monocultures and their environmental impact: A case study of the expansion in South America. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074010.
- Matulić, D., Tomljanović, T., & Piria, M. (2020). Feeding systems in aquaculture: Efficiency and environmental impact. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 11(3), 123–135.
- Marrone, A., Mangano, M. C., Deidun, A., Berlino, M., & Sarà, G. (2023). Effects of habitat fragmentation of a Mediterranean marine reef on the associated fish community: Insights from biological traits analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1957.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405(6790), 1017–1024.
- Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.
- Nordvang, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359–379.
- O’Flynn, N., FitzGerald, R. J., & Hayes, M. (2021). Plant-based proteins as alternatives to fishmeal in aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 27(3), 123–135.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O. & Adedeji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public Health Rev*, 39, 21.
- Páez-Osuna, F. (2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environmental Management*, 28(1), 131–140.
- Paez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaricultura en la zona costera. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1, 21–31.
- Pardoe, J. R., Leach, D. H., & Minchinton, T. E. (2022). Environmental challenges of plant-based feed ingredients in aquaculture: Implications for water and nutrient management. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111–121.

- Parker, R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.
- Pearson, T. H., & Black, K. D. (2001). *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press.
- Pérez, M., Romero, J., & Duarte, C. M. (2008). *Nutrient dynamics in seagrass ecosystems*. Springer.
- Pu, Y., Zhang, Mi., Jia, L., Zhang, Z., Xiao, W., Liu, Shoudong., Zhao, J., Xie, Y & Lee, X. (2022). Methane emission of lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, 107883.
- Rahman, M., et al. (2022). Land use transformation and environmental consequences of aquaculture expansion in Sundarbans. *Environmental Sustainability*, 25(1), 87–104.
- Read, P., & Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, 226(1–4), 139–163.
- Ruiz, J. M., Pérez, M., & Romero, J. (2001). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: Seagrass decline after organic loading cessation. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), 38–41.
- Serpa, D., Duarte, P. (2008). Impacts of Aquaculture and Mitigation Measures. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, 2, Special Issue 1, 1–20.
- Soussana, J. F., Lemaire, G., & Van de Kuilen, S. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture: Global impact of feed production. *Agricultural Systems*, 181, 102808.
- Sulistijowati, R., Yuliati, L., Komariyah, S. & Musaiyarah, A., (2023). Analysis of Trade, Investment, and Global Value Chain on the Gross Domestic Product of Fisheries Sector in Indonesia. *International Journal of professional business review*, 8(6).
- Sun, Z., Wang, L., Tian, H., Jiang, H., Mou, X., & Sun, W. (2013). Fluxes of nitrous oxide and methane in different coastal Suaeda salsa marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*, 90, 856–865.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2009). Aquaculture feed and the environment: A global perspective. *Aquaculture*, 292(1–2), 1–13.
- Talbot, C., Corneillie, S., & Korsøen, O. (1999). Optimal feeding strategies for cage farming of salmonids. *Aquaculture International*, 7(2), 123–135.
- Tidwell, J. H., & Allan, G. L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. Ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries. *EMBO Reports*, 2(11), 958–963.
- Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767–784.
- Thorpe, J. E., & Cho, C. Y. (1995). Nutritional requirements and feeding strategies for salmonids. *Aquaculture Nutrition*, 1(1), 77–87.
- Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M. P., & Garcia-Vargas, M. (2000). Environmental impacts of intensive aquaculture: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7–12), 550–563.
- United Nations Environment Programme. (2022). *How do greenhouse gases actually warm the planet?* <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-do-greenhouse-gases-actually-warm-planet>
- Walters, B. B., Ronnback, P. J., Kovacs, J. M., Bradley B., Crona, B., Hussain, S. A., Badola, R., Primavera, J. H., Barbier, E., & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 220–236.
- White, P. (2013). Environmental consequences of poor feed quality and feed management. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. On-farm feeding and feed management in aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583*. Rome, FAO, 553–564.
- Wróbel, J., Gałczyńska, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., & Formicki, K. (2023). The challenges of aquaculture in protecting the aquatic ecosystems in the context of climate changes. *Journal of Water and Land Development*, 57, 231–241.
- Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.

# Poglavlje 3. Globalno zagrijavanje i razmnožavanje, biotehnologija u akvakulturi

**prof. dr. sc. Halyna Krusir**

**prof. dr. sc. Maryna Mardar**

**izv. prof. dr. sc. Olha Sahdieieva**

**Nacionalno tehnološko sveučilište u Odesi**

## Uvod

Vodeni ekosustavi, ključni za globalnu biološku raznolikost i ljudsku egzistenciju, prolaze kroz neviđene promjene zbog globalnog zatopljenja. Porast temperatura, potaknut antropogenim klimatskim promjenama, remeti cikluse razmnožavanja, stope preživljavanja i genetski integritet vodenih vrsta. Istodobno, područje akvakulture upravlja tim izazovima kroz inovativna biotehnološka rješenja. S obzirom na to da se svjetsko oslanjanje na vodene resurse povećava kako bi se zadovoljili zahtjevi sigurnosti hrane, integracija naprednih tehnologija uzgoja, uključujući selektivni uzgoj, genomsku selekciju i uređivanje gena CRISPR-Cas9, nudi transformativni potencijal za rješavanje dvostruke krize klimatskih promjena i održive akvakulture.

Ovo poglavlje istražuje složenu interakciju između promjena okoliša i biotehnološkog napretka u akvakulturi. Započinje ispitivanjem kako globalno zatopljenje utječe na cikluse razmnožavanja i dinamiku preživljavanja vodenih vrsta, što rezultira značajnim promjenama u strukturama populacije i funkcijama ekosustava. Fokus se zatim prebacuje na revolucionarna biotehnološka rješenja, kao što su selektivni uzgoj i genomska selekcija, koja povećavaju otpornost i produktivnost vrsta akvakulture. Nadalje, raspravlja se o revolucionarnoj tehnologiji uređivanja gena CRISPR-Cas9, ističući njezinu primjenu u poboljšanju otpornosti na bolesti, stope rasta i prilagodljivosti okolišu kod različitih vrsta riba. Konačno, ispituju se etička, ekološka i regulatorna razmatranja koja okružuju ove tehnologije, naglašavajući potrebu za održivim i odgovornim inovacijama u akvakulturi.

Implikacije tih rasprava dalekosežne su i utječu ne samo na budućnost akvakulture, već i na globalne napore za ublažavanje gubitka biološke raznolikosti i utjecaja klimatskih promjena. Ovaj uvod postavlja pozornicu za sveobuhvatnu analizu izazova i prilika koje predstavlja integracija biotehnologije u akvakulturu u kontekstu globalnog zatopljenja.

## 1. Klimatske promjene i razmnožavanje vrsta

### Promjene u uzgojnim ciklusima

Globalno zatopljenje, potaknuto klimatskim promjenama izazvanim ljudskim djelovanjem, ima dubok utjecaj na ekosustave diljem svijeta, uključujući vodeni okoliš. Jedno od najznačajnijih područja pogođenih porastom temperatura je uzgoj vodenih vrsta. Promjene temperature vode mijenjaju cikluse razmnožavanja, vrijeme mriješćenja, stope rasta i stope preživljavanja potomstva, što dovodi do promjena u strukturi i funkcioniranju vodenih populacija. Ovaj pregled literature ima za cilj istražiti kako promjene u okolišu utječu na vodene vrste, s fokusom na promjene u ciklusima razmnožavanja i genetskoj prilagodbi.

**Promjene u uzgojnim ciklusima.** Porast temperature vode zbog globalnog zatopljenja jedan je od glavnih pokretača promjena u reproduktivnom ponašanju vodenih vrsta. Mnoge se vrste oslanjaju na specifične temperaturne znakove kako bi započele razmnožavanje. S porastom temperatura, vrijeme razmnožavanja se promijenilo, a ti pomaci mogu dovesti do neusklađenosti između vrsta i njihovih staništa.

**Vrijeme mriješćenja.** Studije su pokazale da se mnoge vodene vrste razmnožavaju ranije tijekom godine zbog viših temperatura vode. Na primjer, primijećeno je da se vrste riba kao što su atlantski bakalar (*Gadus morhua*) i smuđ (*Perca fluviatilis*) mriješte ranije u sezoni kao odgovor na povećane temperature vode (Tompkins i sur., 2017). Iako se raniji mrijest u početku može činiti korisnim, često dovodi do neusklađenosti s dostupnošću resursa hrane za ličinke, jer fitoplankton, primarni izvor hrane za mnoge mlade ribe, možda nije dostupan u isto vrijeme (Durant i sur., 2007). To bi moglo rezultirati smanjenom stopom preživljavanja potomstva, što bi dodatno utjecalo na dinamiku populacije.

Štoviše, raniji mrijest ne jamči nužno uspjeh jer se vrste mogu mrijestiti prije nego što su ispunjeni optimalni uvjeti za preživljavanje ličinki. Neusklađenost u vremenu može dovesti do smanjenog broja održivih potomaka, što potencijalno dovodi do dugoročnog pada populacije (O'Reilly i sur., 2008).

**Stope rasta i metabolički učinci.** Povećanje temperature vode također utječe na brzinu metabolizma vodenih vrsta. Više temperature obično ubrzavaju rast mnogih vrsta povećavajući brzinu metabolizma (Angilletta i sur., 2004). Međutim, ovo povećanje stope rasta ne mora uvijek biti korisno. Vrste koje prebrzo rastu u toplijim vodama možda neće razviti potrebnu veličinu ili snagu da prežive u odrasloj dobi, što rezultira slabijim jedinkama s manjim šansama za uspješno razmnožavanje (Heath i sur., 2014). Osim toga, brži rast nije uvijek u korelaciji s povećanjem reproduktivnog uspjeha, jer se vrsta može suočiti s neusklađenošću u vremenu svojih razvojnih prekretnica i uvjetima okoliša.

**Stope preživljavanja ličinki.** Rane životne faze vodenih vrsta često su najosjetljivije na promjene u okolišu, a porast temperature vode može dodatno pogoršati te ranjivosti. Povišene temperature mogu smanjiti razinu kisika u vodi, utječući na stopu preživljavanja ličinki, koje zahtijevaju visoke koncentracije kisika za pravilan razvoj (Pörtner i sur., 2014). Nadalje, više temperature mogu stresirati mlade organizme, ostavljajući ih manje sposobnima za suočavanje s drugim ekološkim izazovima, kao što su grabežljivost ili nestašica hrane (Walther i sur., 2002).

### 1.1. Genetska prilagodba klimatskim promjenama

**Iako promjene u okolišu predstavljaju izazove za vodene vrste, neke imaju potencijal genetski se prilagoditi tim promjenjivim uvjetima.** Genetska prilagodba uključuje promjene u genetskom sastavu populacija tijekom vremena koje omogućuju vrstama da se nose sa stresorima iz okoliša, uključujući više temperature.

**Prilagodba temperaturnim promjenama.** Istraživanja su pokazala da su određene vrste pokazale određeni stupanj genetske prilagodbe rastućim temperaturama. Na primjer, studije o atlantskom bakalaru pronašle su dokaze o lokalnoj prilagodbi različitim toplinskim uvjetima u različitim geografskim područjima (Jorgensen i sur., 2017.). Neke populacije bakalara koje žive u toplijim vodama razvile su genetske osobine koje im omogućuju uspješno mriješćenje na višim temperaturama. Slično tome, neke vrste riba mogu pokazivati promjene u reproduktivnom vremenu ili fiziološkoj toleranciji, prilagođavajući se toplijem okruženju tijekom više generacija (Lynch i sur., 2014.).

Međutim, sposobnost vrsta da se genetski prilagode ograničena je čimbenicima kao što su genetska raznolikost i brzina kojom se događaju promjene u okolišu. Vrste s niskom genetskom raznolikošću ili one u staništima koja se brzo zagrijavaju mogu se teško prilagoditi dovoljno brzo da izbjegnu pad populacije (Fischer i sur., 2014.). Osim toga, proces genetske prilagodbe je spor, a stopa zagrijavanja može premašiti sposobnost nekih vrsta da se pravovremeno genetski prilagode.

**Smanjen reproduktivni uspjeh i pad populacije.** Dok se neke vrste mogu uspješno prilagoditi temperaturama zagrijavanja, druge se mogu suočiti s izazovima koji smanjuju njihov reproduktivni uspjeh ili dovode do pada populacije. Na primjer, vrste sa specijaliziranim zahtjevima za uzgoj, poput onih koje se oslanjaju na određene temperaturne raspone za mrijest, mogu se teško nositi s brzim temperaturnim promjenama uzrokovanim globalnim zatopljenjem (Parmesan, 2006.). U takvim slučajevima reproduktivni uspjeh može se smanjiti, a populacije mogu doživjeti pad u brojnosti ili čak lokalno izumiranje.

Vrste koje se genetski ne prilagođavaju rastućim temperaturama možda se neće moći uspješno razmnožavati u svojim izvornim staništima, što dovodi do gubitka genetske raznolikosti i daljnjeg smanjenja njihovih šansi za preživljavanje u slučaju klimatskih promjena (Chevin i sur., 2010).

**Utjecaj globalnog zatopljenja na razmnožavanje vodenih vrsta je višestruk,** uključujući promjene u ciklusima razmnožavanja, promjene u stopama rasta i promjene u stopama preživljavanja potomstva. Porast temperatura doveo je do ranijeg mrijesta kod mnogih vrsta, ali to može uzrokovati neusklađenost s dostupnošću hrane i optimalnim uvjetima okoliša, što rezultira nižim stopama preživljavanja ličinki. Iako se neke vrste mogu genetski prilagoditi promjenjivim temperaturama, stopa promjena u okolišu može premašiti njihovu sposobnost da to učine, što dovodi do smanjenog reproduktivnog uspjeha i potencijalnog pada populacije. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se razumjele dugoročne posljedice ovih promjena na vodene ekosustave i razvile strategije za ublažavanje učinaka klimatskih promjena na ove vrste.

## 2. Napredne metode uzgoja

### 2.1. Selektivni uzgoj

Akvakultura je brzo rastući sektor koji značajno doprinosi globalnoj sigurnosti hrane. Kako se klima nastavlja mijenjati, akvakultura se suočava sa sve većim izazovima, kao što su porast temperatura i sve češći ekstremni vremenski događaji. Kako bi se riješili ovi izazovi, biotehnološki napredak, posebno u selektivnom uzgoju i genomskoj selekciji, sve se više primjenjuje za razvoj vrsta akvakulture koje su otpornije na stresove povezane s klimom.

Selektivni uzgoj desetljećima je kamen temeljac akvakulture, povećavajući produktivnost i otpornost uzgajanih vrsta. Proces uključuje odabir jedinki sa poželjnim osobinama za reprodukciju, čime se postupno poboljšava genetski sastav populacija. Tradicionalni selektivni uzgoj u akvakulturi usredotočio se na osobine kao što su stopa rasta, otpornost na bolesti i učinkovitost pretvorbe hrane. S klimatskim promjenama koje pojačavaju stresore okoliša, sve je veći naglasak na uzgoju osobina koje daju veću otpornost na povišene temperature vode i druge izazove povezane s klimom.

Istraživanja su pokazala da selektivni uzgoj može pomoći vrstama akvakulture, kao što su ribe i školjkaši, da se prilagode toplijim okruženjima. Na primjer, studije o atlantskom lososu pokazale su da selektivni uzgoj može povećati toleranciju na temperaturu, potencijalno omogućujući uzgojenim populacijama da prežive u toplijim vodama koje su posljedica klimatskih promjena (Gjøn i sur., 2018). Osim toga, selektivni programi uzgoja sve se više usredotočuju na osobine poput otpornosti na bolesti i sposobnosti izdržavanja hipoksičnih uvjeta, koji će vjerojatno postati sve češći kako temperatura vode raste (Houston i sur., 2018).

Selektivni uzgoj za otpornost na klimatske promjene također uključuje poboljšanje osobina ponašanja. Na primjer, ribe koje pokazuju veću toleranciju na stresore kao što su gužva i rukovanje mogu bolje podnijeti teže uvjete stvorene klimatskim promjenama (Huntingford i sur., 2020). Ovi programi uzgoja imaju za cilj osigurati da vrste akvakulture mogu nastaviti napredovati pod promjenjivom klimom, pridonoseći dugoročnoj održivosti.

### 2.2. Genomska selekcija

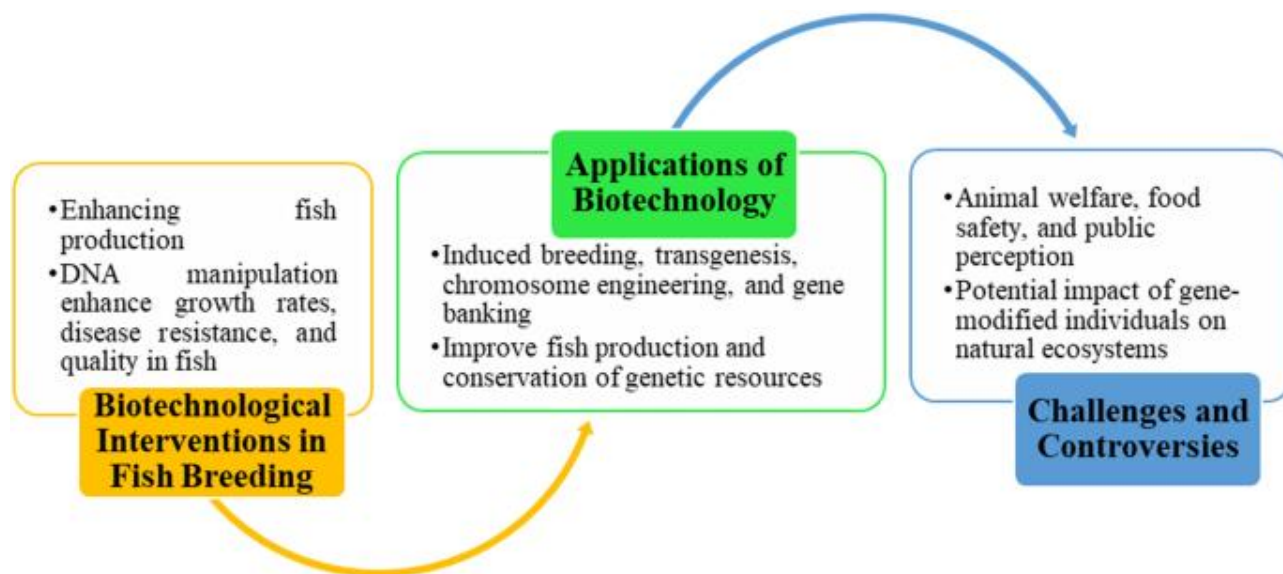
Upotreba moderne biotehnologije za poboljšanje proizvodnje vodenih vrsta ima veliki potencijal ne samo za zadovoljavanje potražnje, već i za poboljšanje akvakulture. Genetska modifikacija i biotehnologija također imaju ogroman potencijal za poboljšanje kvalitete i količine ribe koja se uzgaja u akvakulturi. Sve je veća potražnja za akvakulturom; biotehnologija može pomoći u zadovoljavanju ove potražnje. Kao i kod svih biotehnološki poboljšanih namirnica, proizvodi akvakulture bit će strogo regulirani prije nego što budu odobreni za tržište. Biotehnološka akvakultura također nudi prednosti za okoliš. Kada se na odgovarajući način integrira s drugim tehnologijama za proizvodnju hrane, poljoprivrednih proizvoda i usluga, biotehnologija može značajno pomoći u zadovoljavanju potreba rastućeg i sve urbaniziranijeg stanovništva u sljedećem tisućljeću. Uspješan razvoj i primjena biotehnologije mogući su samo ako postoji široka baza istraživanja i znanja u biologiji, varijacijama, uzgoju, agronomiji, fiziologiji, patologiji, biokemiji i genetici manipuliranog organizma. Prednosti koje nude nove tehnologije ne mogu se ostvariti bez stalne predanosti temeljnim istraživanjima.

Biotehnološki programi moraju biti u potpunosti integrirani u istraživačku pozadinu i ne mogu se izvući iz konteksta ako žele uspjeti.

Na Slici 3.1. prikazana je uloga biotehnologije u povećanju proizvodnje ribe.

Genomska selekcija, koja koristi genomske alate za identifikaciju i širenje poželjnih osobina, predstavlja značajan korak naprijed u akvakulturi. Ova tehnika uključuje povezivanje genetskih markera s osobinama od interesa, omogućavajući učinkovitiju selekciju. Genomska selekcija može ubrzati uzgojne programe omogućujući uzgajivačima da identificiraju jedinke s najboljim genetskim potencijalom za otpornost na stresore iz okoliša.

Jedna od najperspektivnijih primjena genomske selekcije u akvakulturi je poboljšanje tolerancije na toplinu. Studija na kalifornijskoj pastrvi (*Oncorhynchus mykiss*) otkrila je da se genomska selekcija može koristiti za identifikaciju markera povezanih s tolerancijom na toplinu, omogućujući razvoj sojeva koji su bolje opremljeni za preživljavanje u toplijim vodama (Liu i sur., 2020). Primjenom genomske selekcije na programe uzgoja, vrste akvakulture mogu biti genetski prilagođene za uspjeh u okruženjima za koja se očekuje da će doživjeti više temperature zbog klimatskih promjena.



Slika 3.1. Uloga biotehnologije u povećanju proizvodnje ribe (Yang i sur., 2021.)

Osim tolerancije na toplinu, genomska selekcija koristi se za poboljšanje drugih osobina povezanih s klimom, kao što su otpornost na bolesti i sposobnost preživljavanja u okruženjima s niskim udjelom kisika. Na primjer, genomski alati koriste se za identifikaciju genetskih markera povezanih s rezistencijom na patogen *Vibrio anguillarum*, koji predstavlja značajnu prijetnju vrstama akvakulture u toplijim vodama (Vázquez i sur., 2018). Upotrebom genomske selekcije za uzgoj riba koje su otpornije na bolesti, sustavi akvakulture mogu postati održiviji i manje ovisni o antibioticima, koji su sve više pod nadzorom zbog svojeg utjecaja na okoliš.

Genomska selekcija također se integrira s tradicionalnim selektivnim uzgojem kako bi se maksimizirao genetski dobitak. Kombinacija genomskih informacija s fenotipskim podacima omogućuje uzgajivačima da donesu informiranije odluke o tome koje jedinke odabrati za reprodukciju. Na primjer, genomski podaci mogu se koristiti za predviđanje budućeg učinka

potomstva, pomažući u izbjegavanju problema kao što su inbreeding i osiguravanje dugoročnog genetskog zdravlja populacija u akvakulturi (Gjøen i sur., 2018).

**Integracija selektivnog uzgoja i genomske selekcije.** Integracija selektivnog uzgoja i genomske selekcije smatra se snažnom strategijom za osiguravanje otpornosti vrsta akvakulture na klimatske promjene. Selektivni uzgoj pruža čvrste temelje poboljšanjem osobina kao što su stopa rasta i otpornost na bolesti, dok genomska selekcija ubrzava proces i povećava preciznost uzgojnih programa. Zajedno, ove tehnike omogućuju brzi razvoj sojeva koji su bolje prilagođeni promjenjivim uvjetima okoliša.

U slučaju atlantskog lososa, na primjer, korišteni su i selektivni uzgoj i genomska selekcija kako bi se stvorili sojevi koji su otporniji na više temperature i bolesti (Gjøen i sur., 2018). Kombinacija ova dva pristupa ima potencijal značajno povećati održivost akvakulture razvojem sojeva koji mogu uspjevati u toplijim, promjenjivijim uvjetima okoliša.

**Izazovi i budući smjerovi.** Iako biotehnološki napredak obećava poboljšanje uzgoja u akvakulturi, potrebno je riješiti neke izazove. Jedna od ključnih briga je potencijal za genetsku homogenizaciju u uzgojenim populacijama, što može dovesti do depresije inbreedinga i smanjene genetske raznolikosti. Za programe uzgoja ključno je učinkovito upravljati genetskom raznolikošću, osiguravajući da vrste akvakulture ostanu prilagodljive budućim promjenama u okolišu (Houston i sur., 2018).

Nadalje, provedba genomske selekcije zahtijeva znatna ulaganja u genomske resurse, uključujući razvoj visokokvalitetnih referentnih genoma i genetskih markera. Iako su genomski alati posljednjih godina postali dostupniji, cijena i složenost tih alata i dalje su prepreka za neke industrije akvakulture (Huntingford i sur., 2020).

Unatoč tim izazovima, kontinuirani razvoj genomskih tehnologija, u kombinaciji s napretkom računalnih alata i strategija uzgoja, ima veliki potencijal za poboljšanje otpornosti vrsta akvakulture na klimatske promjene.

Biotehnološki napredak u uzgoju u akvakulturi, uključujući selektivni uzgoj i genomsku selekciju, nudi obećavajuća rješenja za izazove koje predstavljaju klimatske promjene. Povećanjem otpornosti vrsta akvakulture na rastuće temperature, bolesti i druge stresore iz okoliša, ove tehnologije mogu pomoći u osiguravanju održivosti industrije. Integracija genomske selekcije s tradicionalnim pristupima uzgoju vjerojatno će biti ključna strategija za razvoj sojeva riba i školjkaša otpornijih na klimatske promjene. Budući da se sektor akvakulture i dalje suočava s pritiscima klimatskih promjena, te će biotehnološke inovacije imati ključnu ulogu u osiguravanju da akvakultura ostane održiv izvor hrane za svjetsko stanovništvo.

### 3. Genetski inženjering i CRISPR

#### 1.1. Genetski inženjering u akvakulturi

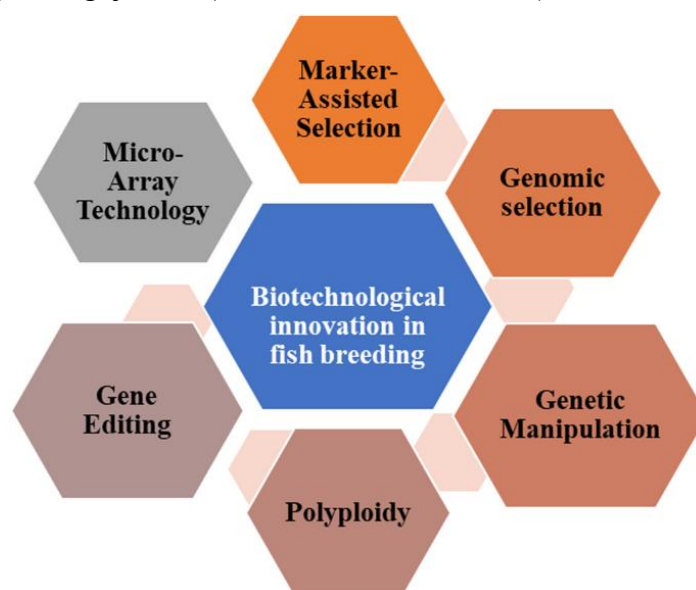
Korištenje biotehnoloških metoda za poboljšanje dobrobiti kultiviranih organizama, povećanje produktivnosti i zaštitu vodenih ekosustava dalo je ohrabrujuće rezultate. Među njima su cjepiva i imunostimulansi, probiotici, prebiotici, simbiotici, paraprobiotici, liječenje fagima, antimikrobni peptidi, genska terapija, RNA interferencija i druge biotehnološke terapije. Genetski napredak u

akvakulturi igra ključnu ulogu u povećanju produktivnosti, smanjenju troškova proizvodnje i minimiziranju utjecaja na okoliš.

Primjeri metoda za uređivanje genoma riba uključuju CRISPR–Cas9, efektorske nukleaze slične aktivatoru transkripcije i nukleaze cinkovog prsta. Molekularna biologija i transgeneza, bankarstvo gena, manipulacija kromosomima, hormonski tretmani, uzgoj ribe s jednim ili više roditelja, stvaranje riba s različitim brojem stanica (poliploidne, triploidne, haploidne, ginogenetičke i androgene) te upotreba sintetičkih hormona u uzgoju riba druge su metode koje se koriste u biotehnologiji riba.

Inovacije u biotehnološkim tehnologijama revolucionirale su genetski uzgoj riba, što je dovelo do značajnog napretka u industriji akvakulture (Yang i sur., 2021).

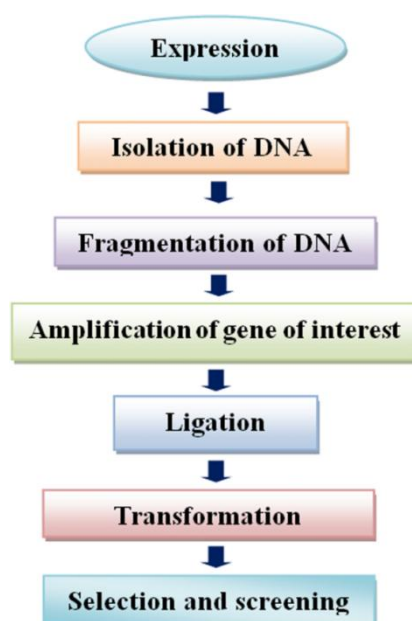
Tehnike kao što su genetski inženjering i CRISPR-Cas9 omogućile su preciznu modifikaciju genoma riba, što je rezultiralo sojevima s povećanim stopama rasta, otpornošću na bolesti i poboljšanom učinkovitošću pretvorbe hrane. Programi selektivnog uzgoja optimizirani su selekcijom potpomognutom markerima, što omogućuje učinkovitiju identifikaciju i razmnožavanje poželjnih genetskih osobina. Nadalje, reproduktivne tehnologije, uključujući mrijest izazvan hormonima i krioprezervaciju spolnih stanica, poboljšale su uspjeh uzgoja i genetsku raznolikost. Ovaj biotehnološki napredak pridonio je održivijim i produktivnijim praksama uzgoja ribe, zadovoljavajući sve veću globalnu potražnju za morskim plodovima. Ovi alati igraju ključnu ulogu u izbjegavanju izumiranja ugroženih vrsta riba i poboljšanju komercijalne proizvodnje ribe. Osim toga, druge biotehnološke metode, kao što su upotreba sintetičkih hormona, monospolna proizvodnja i transgeneza, doprinose napretku u uzgoju riba. Ovi alati igraju značajnu ulogu u sprječavanju izumiranja ugroženih vrsta riba i poboljšanju komercijalne proizvodnje ribe. Osim toga, druge biotehnološke metode, kao što su upotreba sintetičkih hormona, proizvodnja monospolnih osoba i transgeneza, značajno doprinose napretku u uzgoju riba. Na slici 3.2. prikazane su različite biotehnološke inovacije u uzgoju riba (Sankaran i Mandal, 2024).



*Slika 3.2. Biotehnološke inovacije u uzgoju ribe*

Genetska raznolikost predstavlja značajan resurs koji se može iskoristiti za pokretanje selektivnih programa uzgoja, za koje je dokazano da značajno poboljšavaju performanse sektora akvakulture. Olakšavanje prijenosa osposobljavanja i tehnologije u različitim sektorima akvakulture može uvelike koristiti vrstama manje vrijednosti, povećavajući njihovu produktivnost i održivost.

Genom organizma može se modificirati umetanjem sintetičke DNK napravljene iz različitih izvora pomoću procesa poznatog kao tehnologija rekombinantne DNK. Implantacija genetskog fragmenta koji sadrži naš ciljni gen u postojeći genom prvi je korak u postupku. U ovoj tehnici restriksijski enzimi, vektori i stanice domaćina koriste se kao alati. Različiti enzimi uključeni su u procese rezanja, sinteze i vezivanja. Enzimi poput restriksijskih enzima dio su ove skupine. Za transport i uključivanje ciljnih gena, vektori su koristan alat. Primjene tehnologije rekombinantne DNK uključuju kloniranje gena, gensku terapiju i poljoprivredu. Slika 3.3 prikazuje različite korake uključene u tehnologiju rekombinantne DNK (Sankaran i Mandal, 2024).



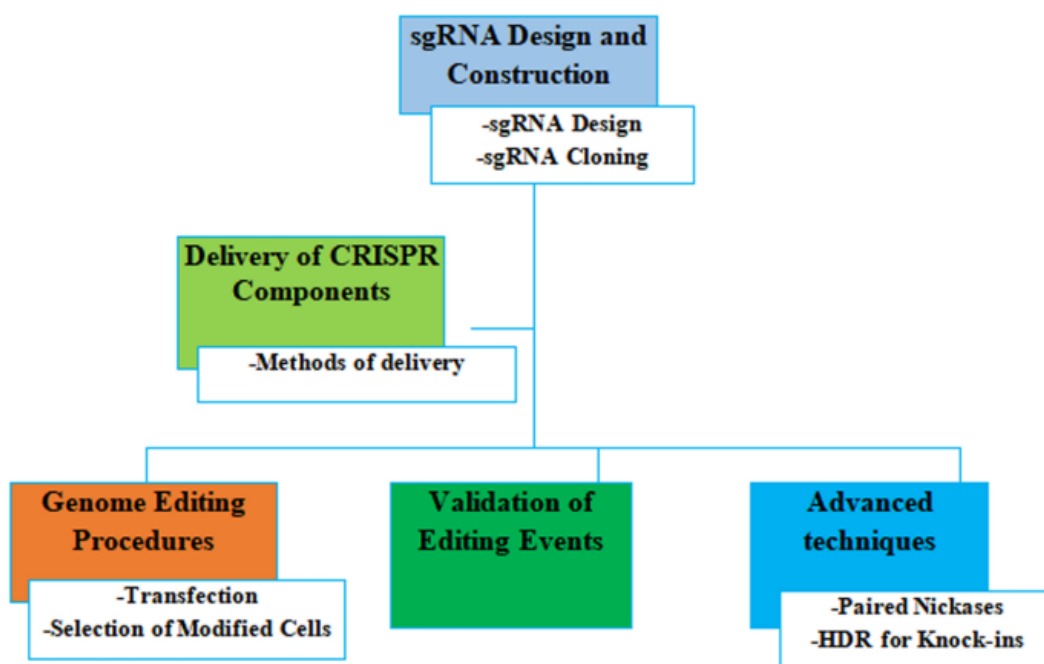
Slika 3.3. Glavni koraci uključeni u tehnologiju rekombinantne DNK (Sankaran i Mandal, 2024)

## 1.2. CRISPR u akvakulturi

CRISPR–Cas9 predstavlja revolucionarni alat u genetičkom inženjeringu, koji omogućuje precizne i ciljane modifikacije riblje DNK kako bi se poboljšale osobine kao što su pigmentacija, rast, kvaliteta mišića i otpornost na bolesti. Ova tehnologija nadmašuje tradicionalne metode uzgoja nudeći isplativiji, jednostavniji i precizniji pristup genetskom poboljšanju. Njegove primjene uključuju poboljšanje performansi rasta (npr. tjelesne mase, duljine i razvoja mišića), poboljšanje kvalitete mišića, povećanje otpornosti na bolesti i olakšavanje određivanja spola. Nadalje, CRISPR–Cas9 nudi obećavajuća rješenja za povećanje otpornosti na bolesti ciljanjem imunološki povezanih gena i puteva prepoznavanja patogena, čime se smanjuje potreba za antibioticima i kemijskim tretmanima. Ova tehnologija značajno je unaprijedila akvakulturu genetskom optimizacijom ključnih svojstava ribljih

vrsta. Na primjer, istraživači su uspješno manipulirali zametnim stanicama u atlantskom lososu kako bi kontrolirali diferencijaciju reproduktivnih stanica, poboljšali učinkovitost pretvorbe hrane za rast žutog soma, postigli ciljne genske modifikacije u tilapiji i smanjili neželjene učinke izvan cilja (Zhu i sur., 2024).

Slika 3.4 prikazuje metode CRISPR-Cas9 uključene u uređivanje gena. Enzim Cas9 i RNK vodič dva su glavna dijela sustava. Pojednostavljena varijanta antivirusnog obrambenog sustava CRISPR–Cas9 koja se nalazi u bakterijama služi kao osnova za sustav CRISPR–Cas9. *In vivo* uređivanje gena omogućeno je umetanjem sintetičke vodeće RNK (gRNA) kompleksirane s Cas9 nukleazom u stanicu, a zatim rezanjem genoma na određenom mjestu. Budući da omogućuje jednostavno, pristupačno i precizno *in vivo* uređivanje genoma, ova je metoda iznimno važna u biotehnologiji i medicini. Osim potencijalne korisnosti u upravljanju štetočinama i bolestima, ima i druge potencijalne primjene u razvoju novih poljoprivrednih proizvoda, genetski modificiranih organizama i farmaceutskih proizvoda. Osim toga, obećava u liječenju nasljednih poremećaja i poremećaja uzrokovanih somatskim mutacijama, uključujući rak. Sustav CRISPR–Cas9 pruža jednostavnu metodu vođenu RNK za induciranje ciljanih promjena na određenim mjestima. Neki fenotipi, poput boje očiju ili osjetljivosti na bolesti, mogu biti izazvani ovim promjenama DNK. Sustav koristi molekule RNK dizajnirane da odgovaraju ciljnim sekvencama DNK u kombinaciji s enzimom nukleaze Cas9.



Slika 3.4. Uređivanje gena CRISPR–Cas9 (Sankaran i Mandal, 2024)

Iako CRISPR–Cas9 ima potencijal revolucionirati područje genetskog inženjeringa, nije bez ograničenja. Točnost uređivanja genoma značajna je briga, jer rezultira trajnim promjenama u genomu. Osim toga, njegova upotreba u genetskoj modifikaciji ljudske zametne linije vrlo je kontroverzna. Općenito, korištenje uređivanja gena CRISPR-Cas9 može revolucionirati područja

biotehnologije i medicine. Međutim, ključna je razboritost i promišljanje etičkih posljedica povezanih s njegovom primjenom (Sankaran i Mandal, 2024).

### 1.2.1. Otpornost na bolesti

Otpornost na bolesti kritična je osobina u akvakulturi, koja odražava sposobnost vrste da izdrži infekcije, lošu kvalitetu vode i promjene u okolišu. Uređivanje genoma posredovano CRISPR-Cas9 pojavilo se kao moćna metoda za povećanje ove otpornosti. Integracijom antimikrobnih peptidnih gena (AMG) u genome riba, CRISPR-Cas9 smanjuje kolonizaciju bakterija, povećava preživljavanje nakon infekcije i mijenja ekspresiju gena povezanih s imunološkim sustavom. Ovo precizno uređivanje dovelo je do značajnog napretka, uključujući povećanu otpornost na infektivnu nekrozu gušterače (IPN) i bakterijsku bolest hladne vode kod lososa, te ciljanje gena JAM-A u amuru kako bi se blokirao ulazak virusa, čime se daje imunitet na reovirus amura (GCRV).

U tilapiji, CRISPR-Cas9 je uredio gene povezane s imunološkim odgovorima, poboljšavajući otpornost na bakterijske patogene kao što su *Streptococcus agalactiae* i *Aeromonas hydrophila*. Slično tome, kod soma, ova tehnologija je ciljala imunoregulacijske gene, što je rezultiralo povećanim stopama preživljavanja nakon izlaganja patogenu. Ovaj napredak nadopunjen je tehnikama uvođenja stranih gena, poboljšavajući otpornost na bolesti dok povećavaju rast i nutritivnu vrijednost kod vrsta kao što su tilapija i som (Zhu i sur., 2024).

### 1.2.2. Rast ribe i kvaliteta mišića

CRISPR-Cas9 bio je ključan u poboljšanju stope rasta i kvalitete mišića u svim vrstama akvakulture, uključujući nilsku tilapiju, kanalskog soma, običnog šarana i kalifornijsku pastrvu. Ciljajući gene povezane s hormonom rasta kao što je miostatin (*mstn*), koji inhibira rast mišića, istraživači su postigli značajna poboljšanja u tjelesnoj masi i razvoju mišića. Na primjer, kanalski som s poremećenim genima *mstn* pokazao je povećanje tjelesne mase od 29,7%. Istodobno, slične modifikacije maslinastog iverka i orade povećale su mišićnu masu i optimizirale komercijalnu veličinu ribe.

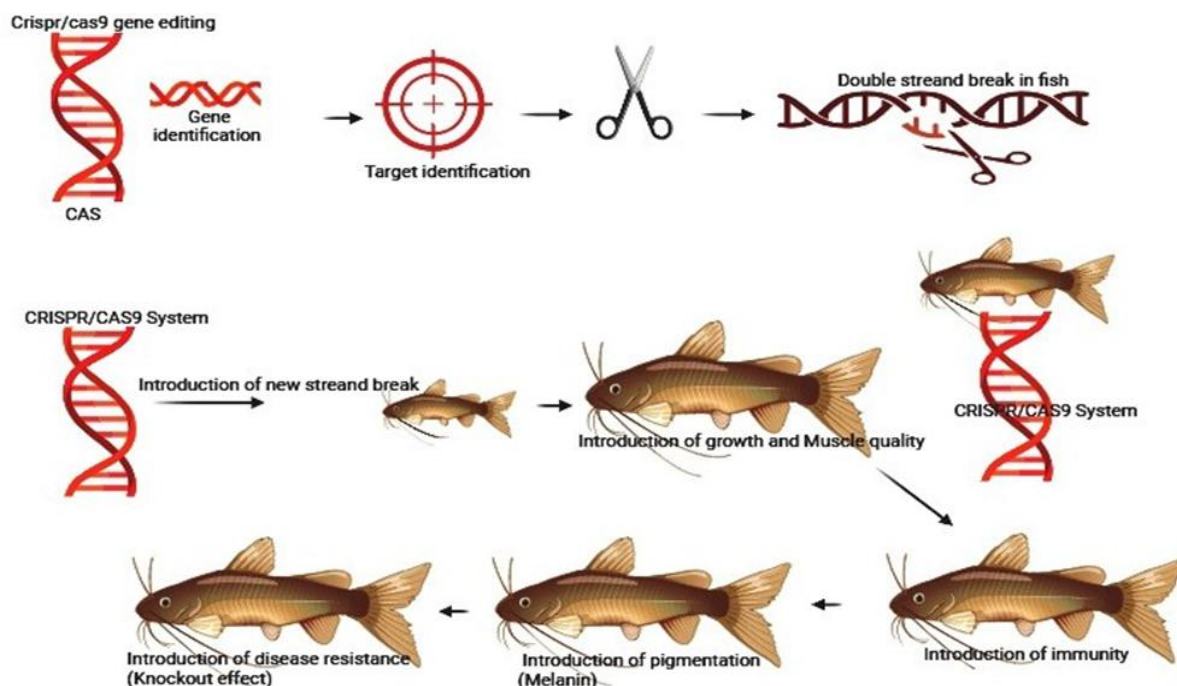
Osim rasta, CRISPR-Cas9 omogućuje proučavanje razvojnih procesa i modeliranje ljudskih bolesti pomoću zebrice, široko korištenog organizma za genetska istraživanja. Transgene tehnike dodatno su unaprijedile uzgoj ribe prekomjernom ekspresijom gena hormona rasta kod vrsta kao što je atlantski losos, što rezultira brzim rastom i većim prinosima koji pomažu u zadovoljavanju globalne potražnje za proteinima. Ove genetske modifikacije, u kombinaciji s optimiziranom prehranom i selektivnim uzgojem, poboljšavaju teksturu mišića i ukupnu učinkovitost akvakulture (Zhu i sur., 2024).

### 1.2.3. Efekti izvan cilja u CRISPR-u-Cas9

Iako CRISPR-Cas9 nudi neusporedivu preciznost, neciljani efekti ostaju zabrinjavajući. Ove nenamjerne izmjene mogu utjecati na neciljane regije genoma, potencijalno uzrokujući štetne učinke. Nedavni napredak, uključujući varijante Cas9 visoke vjernosti (npr. SpCas9-HF1, eSpCas9), značajno je smanjio aktivnost izvan cilja. Poboljšani dizajn vodilice RNA (gRNA) i algoritmi, kao što je CRISPR-DO, imaju poboljšanu specifičnost. Osim toga, novi alati poput baznih i primarnih uređivača omogućuju precizne modifikacije genoma bez izazivanja prekida dvolanča, čime se minimiziraju mutacije izvan cilja. Napredni sustavi isporuke, kao što su nanočestice i virusni vektori, dodatno povećavaju točnost u aplikacijama za uređivanje gena.

Zebrice i druge vrste akvakulture, uključujući tilapiju i atlantskog lososa, imale su koristi od ovog napretka. Uređivanje visoke vjernosti omogućilo je istraživačima da poboljšaju rast, otpornost na bolesti i druge osobine uz održavanje genomske integriteta.

Mehanizam koji koristi CRISPR-Cas9 u nokaut genima kod različitih vrsta riba prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5. Koraci primjene CRISPR-Cas9 u akvakulturi (Prvo, specifična gRNA je dizajnirana da odgovara ciljnoj sekvenci gena. Zatim se protein Cas9 veže za ciljnu DNK, uzrokujući prekid dvolanca. Konačno, prekid je popravljen) (Zhu i sur., 2024)

#### 1.2.4. Određivanje spola

Određivanje spola kod riba uključuje genetske, okolišne i epigenetske čimbenike, što ga čini složenim, ali vitalnim područjem proučavanja u akvakulturi. CRISPR–Cas9 je osvijetlio mehanizme spolne diferencijacije preciznim ciljanjem relevantnih gena. Na primjer, uređivanje gena *amh* u nilskoj tilapiji rezultiralo je fenotipskim ženjkama od genetskih mužjaka, pokazujući ulogu gena u određivanju muškog spola. Slične studije na zebrici istraživale su gene kao što su *dmrt1* i *sox9a*, otkrivajući poligenu prirodu određivanja spola kod ove vrste. Osim toga, probiri CRISPR-Cas9 u cijelom genomu identificirali su glavne regulatore kao što je *gen sdY* u kalifornijskoj pastrvi, unaprjeđujući naše razumijevanje spolne diferencijacije.

#### 1.2.5. Učinci korištenja CRISPR-Cas9 u uređivanju gena na različitim vrstama riba

CRISPR–Cas9 bavi se izazovima kao što su izbijanje bolesti, slabe stope rasta i degradacija okoliša u akvakulturi. Njegove se primjene proširuju na kontrolu invazivnih vrsta, inženjering mikroorganizama za sanaciju okoliša i stvaranje genetski modificirane ribe za održivu proizvodnju. Uređivanje genoma nudi rješenja za poboljšanje osobina riba uz ublažavanje ekološkog otiska

akvakulture. Na primjer, transgene ribe s poboljšanom učinkovitošću pretvorbe hrane smanjuju upotrebu resursa, podržavajući ekološki prihvatljive prakse.

Omogućavanjem preciznih genetskih modifikacija, CRISPR-Cas9 je transformirao akvakulturu, utirući put održivim i učinkovitim praksama uzgoja ribe. Kontinuirani napredak u tehnikama uređivanja, etičkim razmatranjima i upravljanju okolišem dodatno će optimizirati njegovu primjenu u industriji. Tablica 3.1 daje sažetak osobina koje su najčešće ciljane za uređivanje genoma u akvakulturi riba (Blix i sur., 2021).

Tablica 3.1. Učinci CRISPR-Cas9 na biološke i ekološke aspekte ribljih vrsta

| Primjenjiva polja               | Utjecaje                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Otpornost na bolesti            | Koristi se za smanjenje virusne infekcije virusom hemoragijske septikemije (VHSV) stanica prirodnog embrija maslinastog iverka hrame (HINAE).                                                   |
|                                 | Omogućuje uređivanje gena kod vrsta kao što su losos, tilapija i kozica kako bi se povećala njihova otpornost na bolesti.                                                                       |
|                                 | Pomaže u deleciji gena <i>JAM-A</i> u stanicama amura, što značajno povećava otpornost na infekciju reovirusom amura (GCRV).                                                                    |
|                                 | Pomaže u poboljšanju linija ribljih stanica za odgovor domaćina i genetsku otpornost na zarazne bolesti, koristeći atlantskog lososa i kalifornijsku pastrvu kao modelne sustave u akvakulturi. |
| Prilagodba okolišu              | Pomaže u uređivanju gena u ribljim vrstama, kao što je uzgojeni losos, kako bi se prilagodili promjenjivom okruženju.                                                                           |
| Poboljšane stope rasta i mišići | Povećava rast mišića izbacivanjem gena receptora melanokortina ( <i>mc4r</i> ) i eksperimentalno je isproban na kanalskom somu i ribi medaka.                                                   |
|                                 | Poboljšao je stope rasta i povećao mišićnu masu kanalskog soma modificirajući gen miostatina u embrijima kanalskog soma.                                                                        |
|                                 | Pomaže u povećanju mišićne mase deverike zbog poremećaja <i>mstn-a</i> .                                                                                                                        |

CRISPR-Cas9 tehnologija uređivanja gena revolucionirala je akvakulturu omogućavajući precizne genetske modifikacije za poboljšanje osobina kao što su otpornost na bolesti, rast i održivost. Ovaj alat također olakšava genske pogone, povećavajući stopu nasljeđivanja modificiranih gena na gotovo 100%, ubrzavajući širenje poželjnih osobina unutar populacije.

Li i suradnici (2021) koristili su CRISPR–Cas9 za stvaranje sterilnih, potpuno muških populacija nilske tilapije, što je rezultiralo bržim stopama rasta i smanjenim ekološkim rizicima od odbjege uzgojene ribe. Slično tome, Wargelius i suradnici poboljšali su otpornost na bolesti atlantskog lososa modificirajući gene bitne za virusnu infekciju, rješavajući značajne gubitke u akvakulturi uzrokovane patogenima poput IPNV i SAV.

Druge studije iskoristile su CRISPR-Cas9 za povećanje otpornosti na bolesti šarana, tilapije i soma ciljanjem imunološki povezanih gena ili putova prepoznavanja patogena. Uređivanje gena povezano s rastom također je dalo značajne uspjehe, kao što *su nokauti miostatina* kod običnog šarana, kanalskog soma i orade, što je dovelo do povećane veličine tijela i stope rasta.

Primjene CRISPR-Cas9 protežu se izvan proizvodnih svojstava, omogućujući stvaranje novih fenotipova. Primjeri uključuju albino nilsku tilapiju i modificirane pacifičke kamenice s pojačanim

rastom. Svestranost tehnologije obuhvaća i vrste kao što su grebenaste kozice, što dodatno pokazuje njezin transformativni potencijal u akvakulturi (Tablica 3.2).

Tablica 3.2. Primjena CRISPR-Cas9 u različitim vrstama riba i njihovi utjecaji (Zhu i sur., 2024)

| Vrste riba                                     | Tehnološki utjecaji                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Nilska tilapija</i>                         | Koristi se za proizvodnju sterilnih populacija nilske tilapije, smanjujući rizik od štete za okoliš od odbjeglih ribe.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Atlantski losos</i>                         | Pomaže u uređivanju gena kako bi se stvorile vrste koje su vrlo otporne na virusne infekcije, npr. losos.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <i>Zebrica</i>                                 | Omogućuje znanstvenicima proučavanje mutacija i genetskih varijanti kod zebrice.<br>Može se koristiti za uspješnu integraciju kompozitnih oznaka u embrije zebrice, omogućujući precizno označavanje i vizualizaciju staničnih struktura ili proteina. To nudi potencijal za proučavanje dinamike proteina, ekspresije gena i drugih bioloških procesa u ovom modelnom organizmu. |
| <i>Kalifornijska pastrva</i>                   | Pokazalo se da smanjuje ekspresiju gena <i>igfbp-2b</i> kod kalifornijske pastrve, utječući na rast i razvoj. Međutim, njegov utjecaj na ukupnu učinkovitost i endokrini sustav ostaje nejasan.                                                                                                                                                                                   |
| <i>Atlantski losos i kalifornijska pastrva</i> | Korišten je za ciljanje jedinstvenih gena povezanih s rastom i imunitetom u stanicama atlantskog lososa, kalifornijske pastrve i coho lososa.                                                                                                                                                                                                                                     |
| <i>Japanska medaka</i>                         | Ima potencijal povećati rast mišića i tjelesnu težinu kod uzgojenih vrsta riba kao što je medaka. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se utvrdio njegov utjecaj na prinos proizvodnje i zdravlje riba.                                                                                                                                                              |
| <i>Maslinasti iverak</i>                       | Može se koristiti za ometanje gena <i>miostatina</i> u maslinastom iverku, potencijalno povećavajući tjelesnu masu i mišićno tkivo, ali potrebna su daljnja istraživanja kako bi se razumjeli njegovi učinci na učinkovitost proizvodnje i zdravlje ribe.                                                                                                                         |
| <i>Kanalski som</i>                            | Korišten je za modificiranje gena <i>miostatina</i> u kanalskom somu kako bi se poboljšao rast i kvaliteta mišića, ali potrebna su daljnja istraživanja kako bi se u potpunosti razumjeli njegovi učinci.                                                                                                                                                                         |

## 4. Tehnologije krioprezervacije i potpomognute oplodnje

### 1.3. Akvakultura i krioprezervacija

Na uzgoj ribe utječu različiti čimbenici, a čak i najiskusniji operateri u mrijestilištu često se susreću s djelomičnim ili potpunim neuspjesima u procesu uzgoja. Da bi se postigla željena količina sjemeni, inducirani uzgoj naširoko se smatra učinkovitom metodom. Tim se pristupom olakšava sazrijevanje i mriješćenje riba u nepovoljnim uvjetima, kao što su nedovoljne količine oborina ili ekstremni klimatski scenariji. Međutim, opetovani uzgojni naponi mogu uzeti značajan danak na zdravlje legla unutar njihovog ograničenog životnog vijeka. Zamjena legla izazovna je zbog logističkih i fizioloških problema povezanih s njihovim transportom. Posljedično, prijevoz spolnih stanica pojavio se kao obećavajuća alternativa, nudeći prednosti slične onima uočenim u stočarstvu.

Integracija biotehnoloških alata u programe uzgoja ribe ključna je za osiguravanje dosljedne i održive proizvodnje sjemeni. Krioprezervacija predstavlja održivo rješenje za proizvodnju visokokvalitetnog

sjemena i genetski superiornih vrsta ribe. Prepoznajući njegov potencijal, Organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO) identificirala je krioprezervaciju kao ključnu strategiju za očuvanje genetskih resursa riba (Betsy i sur., 2022).

Krioprezervacija se odnosi na očuvanje bioloških uzoraka na ekstremno niskim temperaturama, učinkovito zaustavljanje metaboličkih aktivnosti i očuvanje strukturnog i funkcionalnog integriteta tih uzoraka na neodređeno vrijeme. Ova tehnologija postala je kamen temeljac reproduktivne biologije, nudeći ključne prednosti za stočarstvo i akvakulturu. Održavanjem temperature ispod  $-130^{\circ}\text{C}$ , metaboličke aktivnosti potpuno prestaju, omogućujući biološkim uzorcima, kao što su stanice, tkiva, pa čak i cijeli organizmi, da ostanu održivi nakon odmrzavanja. Krioprezervacija ima posebnu važnost za očuvanje vrijednog genetskog materijala, poboljšanje programa uzgoja i podršku naporima za očuvanje biološke raznolikosti (Fletcher i Rise, 2012).

### ***Mehanizmi očuvanja***

Krioprezervacija omogućuje očuvanje spolnih stanica tijekom duljeg razdoblja, često u trajanju od nekoliko godina, bez značajnog utjecaja na njihovu sposobnost oplodnje. Snižavanjem temperature na približno  $-196^{\circ}\text{C}$ , sve biološke i biokemijske aktivnosti su zaustavljene, sprječavajući procese koji dovode do stanične smrti i razgradnje DNK. Ova je tehnika moćan alat za potporu dugoročnoj održivosti akvakulture i očuvanju biološke raznolikosti.

Međutim, stvaranje leda u biološkim sustavima predstavlja značajan izazov jer može dovesti do mehaničkih oštećenja i osmotske neravnoteže. Kontrolirani procesi hlađenja osiguravaju da se led stvara izvanstanično, stvarajući tako gradijent koncentracije koji olakšava istjecanje vode iz stanica. Ovaj proces sprječava smrtonosno stvaranje unutarstaničnog leda. Napredak u krioprotektivnim sredstvima (CPA) bio je ključan u ublažavanju ovih oštećenja, omogućujući uspješno očuvanje različitih tipova stanica, tkiva i malih bioloških struktura. Usavršavanjem međudjelovanja između brzina hlađenja, koncentracija CPA i karakteristika specifičnih za stanicu, istraživači su poboljšali ishode krioprezervacije.

### ***Krioprotektivna sredstva***

Krioprotektivna sredstva igraju ključnu ulogu u smanjenju unutarstaničnog stvaranja leda i očuvanju integriteta proteina i membrane tijekom zamrzavanja i odmrzavanja. Ovi agensi spadaju u dvije kategorije: propusni i nepropusni. Propusni CPA, kao što su DMSO, glicerol i metanol, prodiru u staničnu membranu kako bi uravnotežili unutarstanične i izvanstanične osmotske pritiske. Nepropusni CPA, uključujući šećere i specifične proteine, prvenstveno djeluju izvanstanično kako bi modificirali točku ledišta otopine i pružili dodatnu zaštitu. Unatoč njihovim prednostima, CPA se moraju koristiti oprezno, jer mogu izazvati toksičnost, osmotski stres i kromosomske abnormalnosti ako se pogrešno primijene. Balansiranje zaštitnih učinaka i potencijalnih štetnih ishoda kritično je područje tekućih istraživanja.

### ***Protokoli hlađenja i odmrzavanja***

Uspjeh krioprezervacije uvelike ovisi o preciznoj kontroli protokola hlađenja i odmrzavanja. Kontrolirane brzine smrzavanja, obično u rasponu od  $-40^{\circ}\text{C}/\text{min}$  do sporijih brzina, ključne su za smanjenje stvaranja kristala leda. Specijalizirani biozamrzivači i metode dušikovih para naširoko se koriste za postizanje ovih kontroliranih uvjeta. Nasuprot tome, odmrzavanje mora biti brzo kako bi

se spriječila rekristalizacija leda, što može ozbiljno oštetiti stanične strukture. Nove tehnologije, uključujući programabilne uređaje za zamrzavanje i napredne tehnike odmrzavanja, imaju za cilj standardizirati i optimizirati te procese za različite biološke materijale, čime se poboljšavaju stope preživljavanja i funkcionalni oporavak (Fletcher i Rise, 2012).

### 1.3.1. Krioprezervacija spolnih stanica

#### *Krioprezervacija sperme*

Krioprezervacija sperme predstavlja jednu od najuspješnijih primjena kriobiologije, s dobro uspostavljenim protokolima u stočarstvu i proširenom primjenom u akvakulturi. Međutim, riblji spermatozoidi pokazuju značajne razlike od sisavaca, što zahtijeva jedinstvene pristupe. Ključne karakteristike sperme riba uključuju njihovu nepokretnost u sjemenoj plazmi, aktivaciju pokretljivosti nakon izlaganja aktivirajućim otopinama, visoku osjetljivost na osmotske promjene i relativno nisku proizvodnju ATP-a. Ove jedinstvene osobine naglašavaju potrebu za prilagođenim strategijama krioprezervacije kako bi se osigurala održivost i funkcionalnost nakon odmrzavanja.

Razvoj učinkovitih protokola za krioprezervaciju sperme riba uključuje nekoliko kritičnih koraka:

- **Prikupljanje sperme.** Dobivanje visokokvalitetne sperme bez onečišćenja je neophodno. Obično se koriste tehnike kao što su masaža trbuha, aspiracija ili izravno vađenje iz testisa, ovisno o vrsti. Mora se paziti da se izbjegne kontaminacija tvarima poput urina, koje mogu prerano aktivirati pokretljivost.
- **Analiza kvalitete.** Procjena kvalitete sperme ključna je za odabir uzoraka pogodnih za zamrzavanje. Procjenjuju se parametri kao što su pokretljivost, održivost, pH i osmolalnost, često koristeći napredne računalne sustave kako bi se osigurala točnost.
- **Formulacija ekstendera.** Ekstenderi su puferirane otopine dizajnirane da spriječe preranu aktivaciju pokretljivosti i osiguraju optimalno okruženje za zamrzavanje. Standardne komponente uključuju glukozu, žumanjak, antioksidanse i CPA poput DMSO-a ili glicerola. Izbor ekstendera razlikuje se ovisno o vrsti i specifičnim zahtjevima.
- **Zamrzavanje i odmrzavanje.** Sperma se obično ubacuje u francuske slamke ili kriovijale i zamrzava kontroliranom brzinom prije skladištenja u tekućem dušiku (-196 °C). Odmrzavanje se mora brzo provesti u vodenoj kupelji kako bi se osigurala maksimalna održivost. Slika 3.6 prikazuje procedure zamrzavanja sperme.



Slika 3.6. Postupak zamrzavanja sperme: (A) ekstrakcija sperme pastrve kaulacijom, (B) razrjeđivanje u nastavku za krioprotekciju, (C) punjenje francuskim slamkama od 0,5 cc (umetnuće s različitim slamkama, kriovijalcima i PVA prahom za brtvljenje slamki), (D) zamrzavanje preko plutajućeg uređaja u kutiji od stiropora koja sadrži N2l, (E) skladištenje u spremniku N2l, (F) striping ženki, (G) odmrzavanje sperme u vodenoj kupelji, i (H-J) oplodnja (Fletcher & Rise, 2012)

### Krioprezervacija jajnih stanica

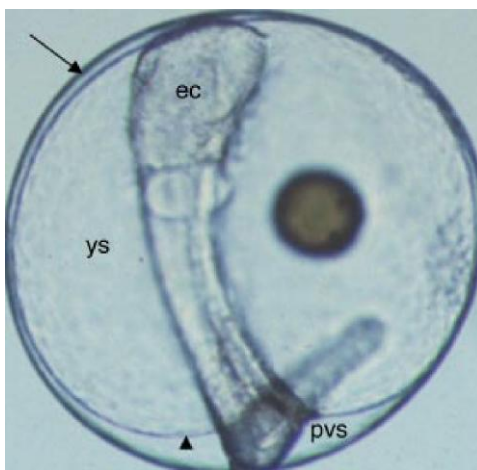
Za razliku od sperme, jajne stanice predstavljaju značajne izazove za krioprezervaciju. Njihova velika veličina, složena struktura i ograničena propusnost za CPA čine ih vrlo osjetljivima na krioštećenje. Problemi kao što su osjetljivost na hlađenje, unutarstanično stvaranje leda i toksičnost CPA posebno su izraženi. Štoviše, prisutnost višestrukih membranskih slojeva i visok sadržaj lipida dodatno otežavaju proces konzerviranja.

Nedavna istraživanja usredotočila su se na očuvanje jajnih stanica u ranim razvojnim fazama, gdje njihova strukturna jednostavnost može smanjiti osjetljivost na krioštećenje. Strategije uključuju postupno uklanjanje CPA kako bi se toksičnost svela na najmanju moguću mjeru, studije o otpornosti na hlađenje i primjenu tehnika vitrifikacije. Vitrifikacija, koja uključuje ultrabrzno zamrzavanje s visokim koncentracijama CPA, nudi obećavajuću alternativu uklanjanjem stvaranja kristala leda. Međutim, i dalje postoje izazovi u postizanju ujednačene distribucije CPA i minimiziranju toksičnosti.

#### 1.4. Krioprezervacija embrija

Krioprezervacija ribljih embrija, čiji je cilj očuvanje genetskog materijala majke i oca, ima znatan potencijal za poboljšanje reproduktivnog upravljanja akvakulturom. Unatoč svom obećanju, uspješna krioprezervacija ribljih embrija ostaje izazov zbog biološke složenosti ovih embrija, uključujući njihovu veliku veličinu, višekompartmentalnu strukturu i ograničenu propusnost za krioprotektivna

sredstva (CPA). Ovi čimbenici, u kombinaciji s prisutnošću barijera poput sincicijskog sloja žumanjka (YSL), ometaju učinkovitu distribuciju CPA-a i vode kroz embrij (slika 3.7, Hagedorn i sur., 1997).



*Slika 3.7. Embrij romba u stadiju repnog pupoljka koji pokazuje različite ovojnice i odjeljke: korion (strelica), sincicijski sloj žumanjka (vrh strelice), žumanjčana vrećica (ys), perivitelinski prostor (pvs) i odjeljak embrija (ec) (Hagedorn i sur., 1997)*

Jedna od glavnih prepreka je visok sadržaj vode u embrijima, što može dovesti do stvaranja leda i oštećenja stanica tijekom smrzavanja i odmrzavanja. Embriji u ranoj fazi, koji teoretski nude jednostavnija strukturna svojstva za očuvanje, osjetljivi su na hlađenje i toksičnost CPA, što dodatno komplicira napore za krioprezervaciju.

Studije o osjetljivosti na hlađenje u ribljim embrijima pokazale su da su rane razvojne faze osjetljivije na niske temperature nego kasnije faze. Strategije za ublažavanje ozljeda od hlađenja uključuju modificiranje strukture embrija i korištenje zaštitnih tvari, kao što su proteini protiv smrzavanja (AFP). Ovi su pristupi pokazali potencijal za povećanje otpornosti na niske temperature, ali još nisu postigli dosljedan uspjeh.

Upotreba vitrifikacije, tehnike koja eliminira stvaranje leda ultrabrzim smrzavanjem, predložena je kao način za prevladavanje ovih izazova. Međutim, vitrifikacija zahtijeva visoke koncentracije CPA, koji mogu biti toksični i teško ih je ravnomjerno rasporediti unutar embrija zbog ograničene propusnosti. Istražuju se različite eksperimentalne tehnike, kao što su povećanje propusnosti embrija i poboljšanje sustava isporuke CPA-a, kako bi se riješila ta ograničenja.

Nedavni napredak uključuje metode za zaobilazanje barijera, kao što je YSL, i poboljšanje prodiranja CPA. Tehnike poput mikroinjekcije CPA-a ili genetskog inženjeringa za poboljšanje propusnosti embrija pokazale su se obećavajućim. Osim toga, upotreba prirodnih proteina protiv smrzavanja pokazala je potencijal u smanjenju stvaranja kristala leda i ublažavanju oštećenja uzrokovanih smrzavanjem. Iako su ove metode još uvijek u eksperimentalnoj fazi, one nude vrijedan uvid u budućnost krioprezervacije embrija.

Prevladavanje izazova krioprezervacije ribljih embrija zahtijevat će interdisciplinarnu suradnju i tehnološke inovacije. Naponi su usmjereni na poboljšanje krioprotekcije na staničnoj razini i poboljšanje tehnika za isporuku CPA. Obećavajući smjerovi uključuju korištenje naprednih laserskih

tehnologija za stvaranje privremenih pora u embrijima i razvoj genetski modificiranih sojeva s povećanom otpornošću na oštećenja smrzzavanjem.

Kontinuiranim istraživanjima krioprezervacija ribljih embrija ima potencijal postati pouzdan alat za akvakulturu, podržavajući očuvanje genetskih resursa i promičući održive prakse u uzgoju ribe.

Tehnologija krioprezervacije razvijena je za mnoge vrste riba (Betsy i sur., 2022):

- Ova se tehnologija može koristiti za očuvanje mliječi najboljeg legla dobne skupine, koji se može koristiti u bilo kojem trenutku u budućnosti.
- Također može eliminirati problem inbreedinga jer se kriokonzervirani spermatozoidi mogu lako razmjenjivati između mrijestilišta.
- Pomoću ove tehnologije spermatozoidi mogu biti dostupni u bilo koje doba godine.
- Omogućuje uzgoj izvan sezone.
- Sinkronizira dostupnost spolnih stanica oba spola, što dovodi do ekonomije sperme.
- Pojednostavljuje upravljanje leglom na farmama.
- Pomaže u proizvodnji održivog i snažnog potomstva hibridizacijom unutar vrste.
- Prevladava poteškoće koje nastaju zbog kratkotrajne održivosti spolnih stanica.
- Omogućuje genetsko očuvanje željenih linija.
- Omogućuje križanje u različito doba godine.
- Pomaže u skladištenju germplazme za programe genetske selekcije ili očuvanje vrsta.
- Kriokonzervirani spermatozoidi mogu pomoći u programima hibridizacije i istraživanju genetskog inženjeringa na ribama.
- To vodi do mnogih drugih puteva, kao što je kriobankarstvo održivih spolnih stanica, kao u slučaju životinjske proizvodnje i razvoja genskih banaka i genetske manipulacije kod riba.

Krioprezervacija predstavlja transformativni alat u biotehnologiji akvakulture, nudeći značajne prednosti za genetsko očuvanje, programe uzgoja i očuvanje biološke raznolikosti. Iako izazovi ostaju, posebno u očuvanju embrija i jajnih stanica, stalni napredak u krioprotektivnim metodama, genetskim alatima i interdisciplinarnim istraživanjima obećava prevladavanje ovih prepreka. Budući razvoj vjerojatno će proširiti opseg i učinkovitost krioprezervacije, osiguravajući njezinu širu primjenu u akvakulturi i šire. Kroz kontinuirane inovacije, krioprezervacija je spremna igrati ključnu ulogu u podršci održivom rastu akvakulture i očuvanju vodene biološke raznolikosti (Fletcher & Rise, 2012).

## 5. Etička, ekološka i regulatorna razmatranja

### 1.5. Etička pitanja u biotehnologiji akvakulture

#### *Dobrobit životinja u genetskoj modifikaciji*

Etičke implikacije genetske modifikacije u akvakulturi su duboke, posebno u pogledu dobrobiti životinja. Genetske intervencije, kao što su transgeneza i uređivanje gena, često imaju za cilj poboljšati proizvodne osobine, uključujući stope rasta, otpornost na bolesti i toleranciju na okoliš. Međutim, ove modifikacije mogu nenamjerno uzrokovati fiziološki stres ili zdravstvene komplikacije. Na primjer, ubrzani rast transgenih riba može dovesti do deformiteta kostura, smanjene imunološke funkcije ili promijenjene brzine metabolizma. Kritičari tvrde da davanje prednosti

produktivnosti nad dobrobiti može ugroziti etički tretman ovih organizama, postavljajući pitanja o ravnoteži između inovacija i humanih praksi.

Ograničena priroda sustava akvakulture dodatno pojačava ovu zabrinutost. Ribe koje se uzgajaju u takvim okruženjima često su izložene velikoj gustoći populacije, što dovodi do stresa, osjetljivosti na bolesti i promjena u ponašanju. Etička razmatranja proširuju se na to jesu li genetski modificirane ribe više ili manje prikladne za razvoj u takvim uvjetima u usporedbi sa divljim. Razvoj mjernih podataka o dobrobiti posebno prilagođenih genetski izmijenjenim vodenim vrstama ključan je kako bi se osiguralo da njihova kvaliteta života ne bude neopravdano ugrožena.

### ***Ekološki integritet i biološka raznolikost***

Osim dobrobiti pojedinca, etička pitanja obuhvaćaju šire ekološke učinke biotehnoloških intervencija. Uvođenje genetski modificiranih ili selektivno uzgojenih vrsta u sustave akvakulture ili prirodna staništa predstavlja rizik za ekološki integritet. Na primjer, transgene ribe s povećanim stopama rasta mogu nadmašiti autohtone vrste za resurse, narušavajući lokalne ekosustave i potencijalno dovodeći do smanjenja ili izumiranja divljih populacija. Ti problemi naglašavaju moralnu odgovornost osiguravanja da biotehnološke primjene ne ugrožavaju biološku raznolikost i otpornost vodenih ekosustava.

Etička rasprava također se dotiče ljudskog upravljanja biološkom raznolikošću. Iako biotehnologija može pomoći u naporima za očuvanje, kao što je krioprezervacija genetskog materijala ugroženih vrsta, ona također postavlja pitanja o pravu čovječanstva da mijenja genetske kodove u ekonomske ili ekološke svrhe. Postizanje ravnoteže između iskorištavanja biotehnologije za pozitivne ishode i očuvanja prirodnih evolucijskih procesa vodenih vrsta ostaje ključni etički izazov.

## **1.6. Regulatorni okviri**

### ***Globalni standardi i smjernice***

Upravljanje biotehnološkim primjenama u akvakulturi složeno je područje koje se razvija. Međunarodne organizacije kao što su Organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO) i Konvencija o biološkoj raznolikosti (CBD) uspostavile su okvire za usmjeravanje sigurne i etičke uporabe biotehnologije. U tim se smjernicama naglašava načelo predostrožnosti, zalažući se za temeljite procjene rizika i praćenje prije odobrenja i puštanja genetski modificiranih organizama (GMO) u sustave akvakulture.

Jedan od ključnih aspekata globalnih standarda je usklađivanje propisa u svim zemljama kako bi se osigurala dosljednost u sigurnosnim mjerama i zaštiti okoliša. To je posebno važno s obzirom na prekograničnu prirodu vodenih ekosustava i mogućnost da bjegunci utječu na vode susjednih zemalja. Suradnja među zemljama putem ugovora i sporazuma ima ključnu ulogu u uspostavljanju jedinstvenih praksi i ublažavanju rizika.

### ***Nacionalni regulatorni pristupi***

Na nacionalnoj razini, regulatorni okviri uvelike se razlikuju, odražavajući različite prioritete, tehnološke kapacitete i društvene stavove prema biotehnologiji. Neke zemlje, poput Sjedinjenih Država i Kanade, imaju uspostavljene robusne sustave za procjenu sigurnosti i učinkovitosti genetski modificiranih organizama, uključujući opsežne procese pregleda koji uključuju znanstvene, ekološke

i javnozdravstvene procjene. S druge strane, druge regije možda neće imati sveobuhvatne regulatorne strukture, što dovodi do nedostataka u nadzoru i do potencijalnih rizika.

Regulatorni pristupi često uključuju procese u više koraka, počevši od laboratorijskih ispitivanja i napredujući kroz kontrolirana terenska ispitivanja prije potpune implementacije. Ovi procesi imaju za cilj procijeniti ekološke, ekonomske i društvene implikacije novih biotehnologija. Javno savjetovanje i transparentnost sve se više prepoznaju kao ključne sastavnice regulatornih okvira kojima se potiče povjerenje i osigurava da odluke odražavaju društvene vrijednosti.

### *Procjene sigurnosti i postupci odobravanja*

Procjene sigurnosti ključne su za regulatorne okvire, pružajući znanstvenu osnovu za procjenu potencijalnih rizika biotehnoloških primjena. Te se procjene obično odnose na nekoliko ključnih područja:

- **Rizici za okoliš.** Procjena vjerojatnosti bijega i potencijalnih ekoloških utjecaja GMO-a, uključujući natjecanje s autohtonim vrstama, hibridizaciju i modifikaciju staništa.
- **Rizici za ljudsko zdravlje.** Osiguravanje da genetski modificirana riba namijenjena konzumaciji ne sadrži alergene, toksine ili neželjene genetske učinke koji bi mogli naštetiti potrošačima.
- **Praćenje ekosustava.** Provedba programa praćenja nakon odobrenja za otkrivanje i ublažavanje nepredviđenih utjecaja, osiguravajući dugoročnu održivost.

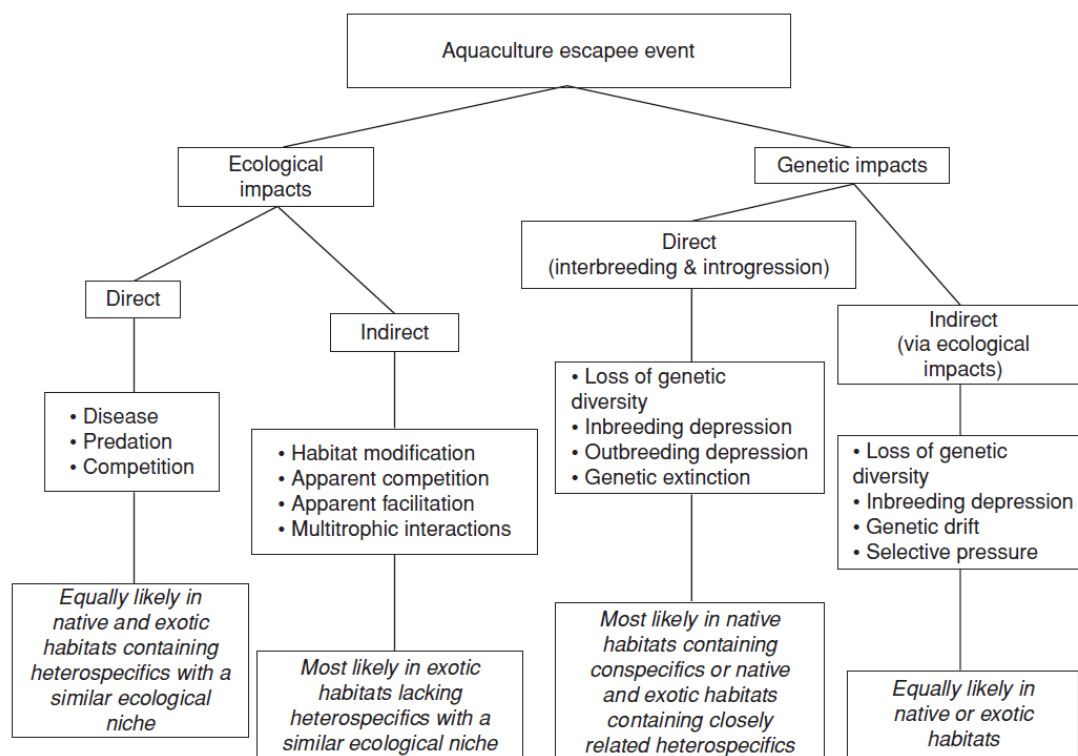
Procesi odobravanja često uključuju koordinaciju između više agencija, uključujući tijela za zaštitu okoliša, poljoprivredu i javno zdravstvo. Rigorozne znanstvene procjene, u kombinaciji s javnim doprinosom, imaju za cilj uravnotežiti inovacije sa sigurnosnim i etičkim razmatranjima.

## **1.7. Utjecaji biotehnologije akvakulture na okoliš**

### **1.7.1. Upravljanje rizicima**

Jedan od najznačajnijih ekoloških rizika biotehnologije akvakulture je genetsko zagađenje, gdje se geni genetski modificiranih ili selektivno uzgojenih vrsta prenose na divlje populacije. To se može dogoditi križanjem, što dovodi do genetske homogenizacije i gubitka lokalno prilagođenih svojstava kod divljih vrsta. Dugoročne posljedice takve genetske introgresije uključuju smanjenu otpornost na promjene u okolišu i smanjenje biološke raznolikosti.

Učinci selekcije pripitomljavanja na genetske i fenotipske karakteristike životinja akvakulture mogu dovesti do različitih potencijalnih utjecaja na okoliš nakon njihovog puštanja u divljinu. Slika 3.8 sažima mehanizme odgovorne za takve utjecaje unutar četiri kategorije: izravni ekološki učinci, neizravni ekološki učinci, izravni genetski učinci i neizravni genetski učinci.



Slika 3.8. Mogući utjecaj bjegunaca iz akvakulture na okoliš

Sustavi akvakulture posebno su osjetljivi na događaje bijega, gdje riba iz uzgoja ulazi u prirodne ekosustave. Ovi bjegunci mogu nadmašiti divlje populacije za resurse, unijeti bolesti i poremetiti dinamiku hranidbenih mreža. Ublažavanje ovih rizika zahtijeva snažne strategije suzbijanja, kao što su fizičke barijere i razvoj sterilnih, genetski modificiranih riba kako bi se spriječilo razmnožavanje u divljini.

### Interakcije s divljim populacijama

Interakcije između uzgojenih i divljih populacija nadilaze genetske utjecaje. Transgene ribe s poboljšanim osobinama, kao što su brži rast ili veća otpornost na bolesti, mogu imati ekološke prednosti u odnosu na divlje. Ove prednosti mogu dovesti do promjena u odnosima grabežljivca i plijena, promijenjene dinamike natjecanja i promjena u korištenju staništa.

Istraživanje ponašanja i ekološke uloge genetski modificiranih riba ključno je za predviđanje i upravljanje tim interakcijama. Dugoročne ekološke studije, u kombinaciji s prediktivnim modeliranjem, mogu pomoći u identificiranju potencijalnih rizika i usmjeravanju praksi upravljanja.

### Dugoročna održivost

Osiguravanje dugoročne održivosti biotehnologije u akvakulturi zahtijeva holistički pristup koji uzima u obzir ekološku, ekonomsku i socijalnu dimenziju. To uključuje smanjenje uništavanja staništa, optimizaciju korištenja resursa i zaštitu divljih populacija. Napredak u biotehnologiji, kao što su razvoj ekološki prihvatljive hrane za životinje i poboljšanja sustava gospodarenja otpadom, može doprinijeti održivijim praksama akvakulture.

Praćenje i prilagodljivo upravljanje ključne su komponente održive akvakulture. Kontinuiranom procjenom utjecaja biotehnoloških intervencija na okoliš i prilagođavanjem praksi u skladu s tim, dionici mogu uravnotežiti produktivnost s ekološkom odgovornošću

### 1.7.2. *Balansiranje napretka i odgovornosti*

Integracija biotehnologije u akvakulturu predstavlja goleme mogućnosti za rješavanje globalnih izazova, uključujući sigurnost opskrbe hranom i očuvanje biološke raznolikosti. Međutim, taj napredak mora biti popraćen snažnom predanošću etičkim načelima, rigoroznim regulatornim nadzorom i proaktivnim upravljanjem okolišem. Poticanjem suradnje između znanstvenika, kreatora politika, dionika u industriji i javnosti, akvakultura se može razvijati na inovativan i održiv način.

Etička, ekološka i regulatorna razmatranja nisu samo prepreke koje treba prevladati, već su sastavni dio odgovornog napretka biotehnologije akvakulture. Pažljivim planiranjem, transparentnim donošenjem odluka i stalnim istraživanjima, sektor može ostvariti svoj potencijal uz očuvanje dobrobiti vodenih ekosustava i zajednica koje o njima ovise (Fletcher i Rise, 2012).

## Sažetak

Globalno zatopljenje značajno je poremetilo cikluse razmnožavanja, stope rasta i opstanak vodenih vrsta. Porast temperature vode mijenja vrijeme mriješta i brzinu metabolizma, što dovodi do neusklađenosti s dostupnošću hrane i neoptimalnih uvjeta za razvoj ličinki. Vrste poput atlantskog bakalara i europskog smuđa razmnožavaju se ranije, što rezultira smanjenim stopama preživljavanja njihovih potomaka. Osim toga, povišene temperature mogu smanjiti razinu kisika u vodi, stresirajući ličinke i utječući na razvoj mladunčadi. Dok neke vrste pokazuju genetske prilagodbe kako bi se nosile s tim promjenama, brze promjene u okolišu često nadmašuju sposobnost populacija da se prilagode, što dovodi do dugoročnog opadanja.

Akvakultura je iskoristila biotehnologiju za ublažavanje ovih izazova i povećanje otpornosti uzgajanih vrsta. Programi selektivnog uzgoja usredotočeni su na osobine kao što su tolerancija na toplinu, otpornost na bolesti i učinkovitost rasta. Genomska selekcija ubrzava ovaj proces korištenjem genetskih markera za razmnožavanje poželjnih osobina. Na primjer, atlantski losos uzgajan je da podnosi više temperature i hipoksične uvjete. U isto vrijeme, genomski alati korišteni su za razvoj sojeva kalifornijske pastrve i drugih vrsta otpornih na bolesti.

Tehnologija CRISPR-Cas9 pojavila se kao revolucionarni alat u akvakulturi, omogućujući precizne i ciljane modifikacije genoma riba. Ova metoda omogućuje poboljšanje ključnih osobina, uključujući rast, kvalitetu mišića, otpornost na bolesti i prilagodbu okolišu. Na primjer, genetske modifikacije u vrstama poput nilske tilapije i kanalskog soma rezultirale su bržim stopama rasta i poboljšanim razvojem mišića ciljanjem gena miostatina (*mstn*). Slično tome, CRISPR-Cas9 je korišten za poboljšanje otpornosti na bolesti kod atlantskog lososa i amura uređivanjem gena povezanih s imunitetom i puteva prepoznavanja patogena.

Osim poboljšanja individualnih osobina, CRISPR ima primjenu u određivanju spola i upravljanju populacijom. Tehnike kao što je stvaranje sterilnih populacija smanjuju ekološke rizike povezane s odbjeglom ribom iz uzgoja. Unatoč ovom napretku, tehnologija nije bez izazova. Učinci izvan cilja i

etička zabrinutost oko uređivanja genoma, posebno u pogledu dobrobiti životinja i ekoloških rizika, zahtijevaju snažan regulatorni nadzor i daljnja istraživanja.

Krioprezervacija je još jedna ključna tehnologija koja nudi rješenja za očuvanje genetskih resursa i povećanje učinkovitosti uzgoja. Čuvanjem spolnih stanica i embrija na ultra niskim temperaturama, ova tehnika podržava očuvanje biološke raznolikosti i programe uzgoja u svim godišnjim dobima i geografskim regijama. Međutim, izazovi kao što su osjetljivost na hlađenje i toksičnost krioprotektivnih sredstava, posebno u jajnim stanicama i embrijima, naglašavaju potrebu za stalnim istraživanjima kako bi se optimizirali protokoli i poboljšale stope uspješnosti.

Integracija biotehnologije u akvakulturu otvara duboka etička i ekološka pitanja. Potencijal genetski modificiranih organizama (GMO) da pobjegnu u prirodne ekosustave i križaju se s divljim populacijama predstavlja rizik za genetski integritet i biološku raznolikost. Regulatorni okviri na nacionalnoj i međunarodnoj razini igraju ključnu ulogu u rješavanju ovih problema, naglašavajući procjene rizika, praćenje i uključivanje javnosti. Etička razmatranja proširuju se i na dobrobit životinja, posebno u osiguravanju da biotehnoške intervencije ne ugrožavaju zdravlje i dobrobit uzgajanih vrsta.

Budućnost akvakulture ovisi o postizanju ravnoteže između tehnološkog napretka i održivosti. Inovacije kao što su CRISPR-Cas9 i genomska selekcija imaju ogroman potencijal za povećanje otpornosti i produktivnosti. Međutim, interdisciplinarna suradnja, snažno upravljanje i upravljanje okolišem ključni su za minimiziranje ekoloških utjecaja i osiguravanje dugoročne održivosti. Davanjem prioriteta etičkim praksama i održivosti, akvakultura može imati ključnu ulogu u rješavanju globalnih izazova sigurnosti opskrbe hranom i očuvanju vodene biološke raznolikosti.

U ovom se poglavlju naglašava važnost rješavanja međusobno povezanih izazova klimatskih promjena i održivosti akvakulture inovativnim i odgovornim biotehnoškim rješenjima. Iskorištavanjem potencijala ovog napretka, industrija akvakulture može doprinijeti globalnim naporima u očuvanju biološke raznolikosti, otpornosti na klimatske promjene i sigurnosti hrane.

## Literatura

Angilletta, M. J., Steury, T. D., & Sears, M. W. (2004). Temperature, growth rate, and body size in ectotherms: Fitting pieces of a life-history puzzle. *Integrative and Comparative Biology*, 44(6), 498–509. <https://doi.org/10.1093/icb/44.6.498>

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

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/10.1111/raq.12571>

Chevin, L. M., Lande, R., & Mace, G. M. (2010). Adaptation to climate change: Combining plasticity and evolution in a changing world. *Ecology Letters*, 13(11), 1318–1333. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01552.x>

Durant, J. M., Hjermann, D. Ø., Ottersen, G., & Stenseth, N. C. (2007). Trophic match–mismatch and climate change: Linking phenologies in predator and prey. *Ecology*, 88(8), 2405–2412. <https://doi.org/10.1890/06-2089.1>

- Fischer, J. R., Brommer, J. E., Helm, B., & Visser, M. E. (2014). Evolutionary responses of aquatic species to climate change. *Nature Climate Change*, 4, 42–51. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Fletcher, G. L., & Rise, M. L. (Eds.). (2012). *Aquaculture biotechnology*. Wiley-Blackwell.
- Gjøen, H. M., Refstie, T., Sahara, E., Ruane, N. M., L'Abe-Lund, T. M., & Fjellidal, P. G. (2018). Aquaculture breeding programs for climate resilience. *Aquaculture Reports*, 12, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.02.003>
- Hagedorn, M., Hsu, E., Kleinhans, F. W., & Wildt, D. E. (1997). New approaches for studying the permeability of fish embryos: Toward successful cryopreservation. *Cryobiology*, 34(4), 335–347. <https://doi.org/10.1006/cryo.1997.2030>
- Heath, M. R., Speirs, D. C., & Steele, J. H. (2014). Climate change and fish growth. *Fish and Fisheries*, 15(3), 319–329. <https://doi.org/10.1111/faf.12025>
- Houston, R. D., Bishop, S. C., Hamilton, A., Guy, D. R., Tinch, A. E., Taggart, J. B., McAndrew, B. J. (2018). Selective breeding for disease resistance in aquaculture species: Challenges and progress. *Fisheries Research*, 200, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.09.020>
- Huntingford, F. A., Turnbull, J. F., Kadri, S., Bergeron, R., Klinger, E., Ruthin, M. L. (2020). The potential of selective breeding for climate resilience in aquaculture species. *Aquaculture*, 525, 735303. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735303>
- Yang, Z., Yu, Y., Tay, Y. X., & Yue, G. H. (2022). Genome editing and its applications in genetic improvement in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 178–191. <https://doi.org/10.1111/raq.12591>
- Jørgensen, C., Ernande, B., Fiksen, Ø., & Dieckmann, U. (2017). Local adaptation of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to thermal variation. *Journal of Evolutionary Biology*, 30(11), 2435–2446. <https://doi.org/10.1111/jeb.13199>
- Li, M., Dai, S., Liu, X., Xiao, H., & Wang, D. (2021). A detailed procedure for CRISPR/Cas9-mediated gene editing in tilapia. *Hydrobiologia*, 848, 3865–3881. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04524-5>
- Lynch, M., & Lande, R. (1993). Evolution and extinction in changing environments. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(7), 142–144. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90245-Y](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90245-Y)
- Liu, Y., et al. (2020). Genomic selection for heat tolerance in rainbow trout: A practical approach. *Journal of Fish Biology*.
- O'Reilly, C. M., Alin, S. R., Plisnier, P.-D., Cohen, A. S., & McKee, B. A. (2008). Impacts of climate change on fish populations. *Science*, 319(5865), 183–186. <https://doi.org/10.1126/science.1149477>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pörtner, H. O., Langenbuch, M., & Reipschläger, A. (2004). Biological impact of elevated CO<sub>2</sub> in aquatic ecosystems: Lessons from animal physiology and Earth history. *Journal of Oceanography*, 60(4), 705–718. <https://doi.org/10.1007/s10872-004-5763-6>
- Tompkins, E. M., White, E. C. & Reeves, A. R. (2017). Effects of warming on fish breeding patterns. *Global Change Biology*, 23(9), 3365–3375. <https://doi.org/10.1111/gcb.13643>
- Vázquez, R., Ponzoni, R. W., Nguyen, N. H., & Houston, R. D. (2018). Genomic selection in aquaculture for disease resistance. *Aquaculture International*, 26(1), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0192-7>
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>



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/10.1038/srep21284>

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>



## **Poglavlje 4. Promjene u hrani i prehrambenim praksama u akvakulturi zbog globalnog zatopljenja**

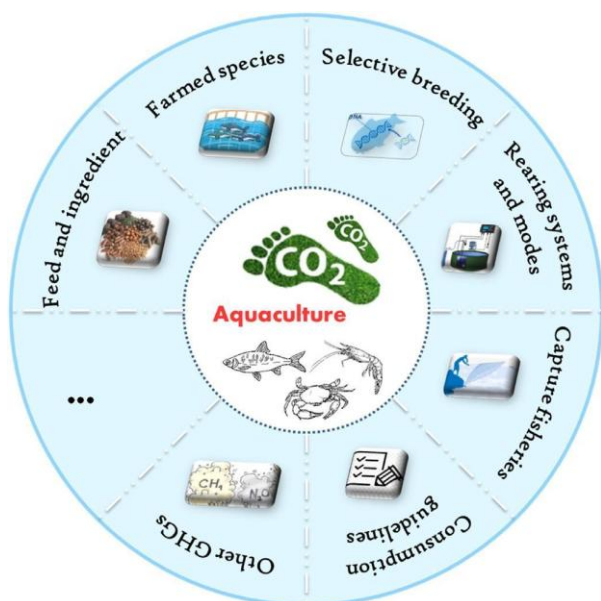
**prof. dr. sc. Ergün Demir**  
**izv. prof. dr. sc. Muhittin Zengin**  
**Sveučilište Balıkesir**

### **Uvod**

Akvakultura je jedan od najbrže rastućih poljoprivrednih sektora na svijetu i sve je važnija za proizvodnju održive i zdrave hrane s relativno malim utjecajem na klimu. Predviđa se da će uzgoj ribe porasti za 32% do 2030. (FAO, 2020). Tržišne sile slažu se da je poticanje rasta europske akvakulture najodrživiji način da se zadovolji sve veća potražnja za ribom. Međutim, izazovno je postići održivu proizvodnju koja doprinosi zdravoj prehrani, ispunjava ciljeve održivog razvoja i teži nultoj stopi emisija (Messeder, 2021). Pod klimatskim promjenama procjenjuje se da će se dostupnost hranjivih tvari smanjiti (Cheung i sur., 2023). Nedostatak visokokvalitetne hrane za životinje i sastojaka hrane za životinje, kao i zabrinutost u pogledu sigurnosti i kvalitete vodenih proizvoda, predstavljaju znatne izazove za održivi razvoj tog sektora (Ma i Hu, 2023).

Uzgoj ribe generira približno 250 milijuna tona ekvivalenta CO<sub>2</sub> godišnje diljem svijeta (MacLeod i sur., 2020.). Uzgoj lososa godišnje generira približno 10 milijuna tona ekvivalenta CO<sub>2</sub>. Hrana za životinje čini u prosjeku 75 % emisija stakleničkih plinova povezanih s proizvodnjom lososa u Norveškoj (Ziv-Douki, 2020). U usporedbi sa stočarskom proizvodnjom, posebno govedinom, proizvodnja morskih plodova ima niže emisije ugljika.

Promjene temperature dovode do slabog rasta i preživljavanja hladnovodnih vrsta, pogoršanja kvalitete vode, oslabljenog imunološkog sustava kod hladnovodnih vrsta, oslabljenog kapaciteta pohrane ugljika u oceanima i povećane virulencije patogena u toplijoj vodi. Budući da hrana za životinje znatno doprinosi ugljičnom otisku akvakulture, trebalo bi ciljati na znatna smanjenja emisija u proizvodnji hrane za životinje (Zhang i sur., 2024).



Slika 4.1. Interventni sektori za smanjenje emisija ugljika u akvakulturi (prilagođeno iz Zhang i sur., 2024).

## 1. Promjene u nutritivnoj fiziologiji

### 1.1. Temperatura i metabolizam

Akvakultura je sama po sebi osjetljivija na utjecaje klimatskih promjena zbog velike ovisnosti o okolišu. Globalno zagrijavanje povećava temperaturu vode, što može povećati stope metabolizma vrsta u akvakulturi, što zahtijeva promjene u formulaciji hrane kako bi se zadovoljile povećane prehrambene potrebe (Reid i sur., 2019). Na bazalne energetske potrebe riba, koje su poikilotermne životinje, izravno utječe temperatura vode. Kako temperatura raste, povećava se njihova standardna brzina metabolizma, kao i njihove potrebe za energijom i proteinima. Nadalje, stupanj do kojeg temperature unutar optimalnog raspona utječu na bazalni metabolizam razlikuje se ovisno o vrsti. Klimatske promjene jedan su od najznačajnijih čimbenika stresa u akvakulturi.

### 1.2. Probava i apsorpcija hranjivih tvari

Promjene u brzini metabolizma izazvane temperaturom utječu ne samo na energiju prehrane, već i na omjer učinkovitosti hrane (FER, dobitak/hrana) ili omjer konverzije hrane (FCR, feed/gain). Razlika u temperaturi vode od nekoliko stupnjeva može proizvesti značajne razlike u prenamjeni hrane za životinje kod nekih vrsta (Siikavuopio i sur., 2012). Promjene FCR-a uzrokovane promjenama u temperaturi vode također mogu dovesti do promjena u probavljivosti određenih kategorija hranjivih tvari, kao što su masne kiseline u salmonidima (Huguet i sur., 2015). S druge strane, može se reći da je utjecaj temperature vode na probavljivost hranjivih tvari kod vodenih životinja općenito minimalan. S tim u vezi, studije provedene s lososom pokazale su da probavljivost proteina i lipida može pokazati male promjene s temperaturom (Amin i sur., 2014). Neke studije pokazuju da toplija voda može utjecati na "vrijeme crijevnog tranzita hrane", ovisno o vrsti. Studije naglašavaju da će visoke temperature vode imati minimalan učinak na hranjive tvari ili probavljivost energije vodenih životinja dok se ne prekorači optimalni raspon (Reid i sur., 2019).

### ***Unos hrane i brzina metabolizma***

Globalno zatopljenje i posljedične klimatske promjene dovode do zagrijavanja i zakiseljavanja vodnih tijela, kao i do promjena u obrascima oborina i vjetra, što zauzvrat utječe na vodene struje, turbulencije i zamućenost. Te promjene utječu na prehranu i endokrini sustav vodenih životinja (Nadermann i sur., 2019). Klimatske promjene i promjene u vodenom okolišu, uzrokovane ispuštanjem ugljikova dioksida (CO<sub>2</sub>) i metana u atmosferu, također mogu utjecati na fiziologiju i ponašanje riba, kao i na hranidbu i endokrinu kontrolu hranjenja (Ahmed i sur., 2019; Volkoff, 2019).

Ribe, kao ektotermna stvorenja, osjetljive su na promjene temperature vode. Povećanje temperature vode dovodi do veće potrošnje kisika i brzine metabolizma, što rezultira povećanim energetskim potrebama (Sandblom i sur., 2014). Iako se ove promjene razlikuju ovisno o vrsti, unos hrane u ribe povećava se s umjerenim porastom temperature (Sharma i sur., 2017). Studije pokazuju da povećanje CO<sub>2</sub> i nizak pH vode smanjuju unos hrane u ribe, narušavajući njihovu sposobnost percepcije kemijskih signala i otkrivanja hrane utječući na njihov njuh (Porteus i sur., 2018). Budući da ribe zahtijevaju povećane pokrete mišića kako bi održale ravnotežu u turbulentnim vodama, one također povećavaju potrošnju energije. Uz to, uvjeti slabe vidljivosti negativno utječu na hranjenje ribe.

### ***Utjecaj klimatskih promjena na mikrofloru ili mikrobiotu riba***

Morfologija probavnog sustava ribe izravno utječe na probavni kapacitet i imunološki status riba. Međutim, osjetljivi su i na toplinski stres, što utječe na njihovo zdravlje (Geda i sur., 2012). Poznato je da toplinski stres može imati štetne učinke na resice i područje apsorpcije u probavnom sustavu različitih životinjskih vrsta, poput svinja i pilića. Međutim, učinci toplinskog stresa na morfologiju ribljih crijeva nisu u potpunosti shvaćeni. Crijevna mikrobiota općenito stupa u interakciju sa crijevima domaćina na složen način i sudjeluje u gotovo svim fiziološkim procesima, uključujući metabolizam i imunitet (Gardiner i sur., 2020; Yadav & Jha, 2019), i osjetljiv je na temperaturne promjene. Pokazalo se da povišena temperatura vode uzrokuje smanjenje korisnih bakterija mliječne kiseline i povećanje potencijalno opasnog *Vibrio* spp. u atlantskom lososu (*Salmo salar*) (Amin i sur., 2016). Međutim, čini se da su učinci toplinskog stresa na crijevnu mikrobiotu specifični za vrstu.

Mikrobiom je široko prepoznat kao važna komponenta u održavanju cjelokupnog zdravlja riba, što potvrđuju brojne studije (Legrand i sur., 2020). Temperatura je ključni abiotički čimbenik koji utječe na fiziološko stanje životinja; to se posebno odnosi na vodene organizme, gdje tjelesna temperatura varira kao odgovor na temperaturu vode (Sepulveda i Moeller, 2020). Stres može poremetiti crijevnu mikrobnu strukturu, utječući tako na fiziološki i imunološki sustav riba (Blacher i sur., 2017). Osim što mijenja strukturu crijeвне mikrobiote, temperatura također može utjecati na metabolizam domaćina i dovesti do promjena u fenotipu (Guillen i sur., 2019). Trinh i suradnici (2017) otkrili su značajne razlike u crijevnoj mikrobioti mladih riba s različitim stopama rasta. Sugerirali su da mikrobiota može utjecati na brzinu rasta mladih riba povećanjem dobitaka u metabolizmu energije. Rimoldi i suradnici (2020) pokazali su da se dominantna crijevna mikrobiota može koristiti za procjenu zdravstvenog stanja brancina.

## 2. Održivi sastojci hrane za životinje u akvakulturi

Akvakultura bi mogla proizvoditi životinjske bjelančevine s nižim emisijama stakleničkih plinova od uzgoja životinja na kopnu (Hilborn i sur., 2018). Stoga je akvakultura klimatski prihvatljiviji sektor proizvodnje bjelančevina od ostalih stočarskih sektora (NOAA Fisheries, 2022). Hrana za akvakulturu koristi više od 70% svjetskog ribljeg brašna i ribljeg ulja (FMFO). Globalno se svake godine u oceanu ulovi oko 30 milijuna tona male ribe, a oko 17 milijuna tona koristi se u hrani za akvakulturu (Cottrell i sur., 2020). Stoga se korištenjem alternativnih izvora proteina za hranu za akvakulturu može smanjiti utjecaj akvakulture na okoliš, potencijalno proizvesti isplativija hrana za životinje i razviti konkurentan sektor. Alternativni izvori proteina, poput brašna od kukaca, nisu novi, ali nedavna ulaganja u ovaj sektor približavaju ih spremnosti za tržište. Dobar primjer za to su nove inicijative pokrenute kako bi se uzgajivačima lososa pomoglo da smanje svoj ekološki otisak za 30% do 2030. godine. Trebalo bi dodatno razviti druge izvore hrane za životinje, posebno morske alge. Istraživanje industrijske biotehnološke hrane za životinje još je jedno područje u nastajanju. Ekstruzija povećava probavljivost i apsorpciju hranjivih tvari u hrani za životinje (Zhang i sur., 2024).

### 2.1. Alternativni izvori hrane/bjelančevina

Očekuje se da će se proizvodnja bjelančevina u EU-u udvostručiti do 2050. Međutim, budući da EU nije samodostatna u proizvodnji bjelančevina, oko 70 % bjelančevina u hrani za životinje se uvozi. Stoga EU mora pronaći održive alternativne izvore bjelančevina koji se mogu ekonomično proizvesti u količinama dovoljnim da zadovolje rastuću potražnju industrije hrane i hrane za životinje (Smárason, 2023). Održivost izvora hrane za životinje za akvakulturu prvenstveno ovisi o dostupnosti visokokvalitetnih sastojaka hrane za životinje, kao što je FMFO. Ovi tradicionalni sastojci hrane za životinje pod sve su većim pritiskom zbog brzog širenja akvakulture za prehranu ljudi, smanjenja ulovljene ribe i klimatskih promjena (Idenyi i sur., 2022).

Više od 90 % stakleničkih plinova u akvakulturi nastaje hranom za ribe koja se koristi. Pristup kružnog gospodarstva može se primijeniti u proizvodnji hrane za ribogojilišta korištenjem novih biomaterijala kako bi se pomoglo u postizanju ciljeva klimatskih promjena (Tait, 2021). Danas otprilike 70% ukupne globalne proizvodnje akvakulture po težini ovisi o opskrbi vanjskim ulazima za hranu. Ova situacija predstavlja jedan od najvećih izazova za buduću održivost akvakulture, što zahtijeva razvoj alternativnih sastojaka hrane (Reid i sur., 2019).

Ograničeni i smanjeni globalni ribolov dovodi do smanjenja globalne proizvodnje ribljeg brašna (oko 5 milijuna tona godišnje) i proizvodnje ribljeg ulja (približno 1 milijun tona godišnje). Budući da se 60-80% ovog ribljeg brašna i otprilike 70-80% ribljeg ulja koristi u akvakulturi (FAO, 2022), obzirom na sve veću potražnju za FMFO-ima koja proizlazi iz stalno rastuće industrije akvakulture, ključno je pronaći prikladne zamjene za FMFO kako bi se podržala održiva akvakultura.

#### *Riblje brašno i riblje ulje kao glavni sastojci hrane za akvakulturu*

Akvakultura je proizvodna linija koja koristi "hranjene" vrste kao što su kozice, brancin i losos te "nehranjene" vrste kao što su srebrni šaran, morske alge i kamenice. Tradicionalno, hranjena akvakultura oslanjala se na akvafeedove koji sadrže visoke razine FMFO (Froehlich i sur., 2018). Međutim, upotreba FMFO-a smatra se vodećim neodrživim čimbenikom u akvakulturi jer povećava

pritisak na riblje stokove i narušava ravnotežu vodenih prehrambenih mreža (Hua i sur., 2019). Ovisnost o hrani za životinje koja se temelji na ribi za akvakulturu predstavlja prijetnju morskoj biološkoj raznolikosti i sigurnosti opskrbe hranom. Kao što je poznato, klimatske promjene i El Niño štete mnogim prirodnim izvorima vodene hrane, posebno fitoplanktonu. Iz tih razloga, količina FMFO koja se koristi u vodenoj hrani smanjuje se tijekom godina. Drugi problem uzrokovan ribljim brašnom je povećano nakupljanje teških metala, kemikalija i mikroplastike u morskim ribama (Hanachi i sur., 2019).

### ***Hrana za životinje/ulja biljnog podrijetla i ekološki izazovi***

Posljednjih godina proizvođači hrane za akvakulturu okreću se poljoprivrednim proizvodima, poput soje, kukuruza i uljane repice, umjesto FMFO-ima. Korištenje transgenog sjemena, vode, pesticida i gnojiva u proizvodnji ovih proizvoda negativno utječe na održivost okoliša. Stoga se čini da je zamjena FMFO sastojaka sastojcima kopnenih proizvoda daleko od postizanja cilja nultog ugljičnog otiska. Također imaju nisku kvalitetu hranjivih tvari, lošu probavljivost i nedostatak esencijalnih aminokiselina kao što su lizin, treonin i triptofan. Iz tog razloga još uvijek nije moguće zamijeniti proteine ribljeg brašna biljnim proteinom. Budući da proizvodi akvakulture ne mogu iskoristiti sintetičke aminokiseline u dovoljnim količinama, više metaboličkog otpada dušika ispušta se u okoliš, što dovodi do učinaka na okoliš. Dugolančane PUFA, kao što su dokozaheksaenska kiselina (DHA) i eikozapentaenska kiselina (EPA), glavne su ograničavajuće masne kiseline u kopnenim biljnim uljima. Slično tome, biljni sastojci hrane sadrže antinutrijente koji mogu promijeniti strukturu korisnih bakterija u probavnom sustavu domaćina i negativno utjecati na metabolizam (Idenyi i sur., 2022). Još jedan problem s biljnom hranom je taj što je otprilike 70% fosfora u njima vezano za fitat, stvarajući potencijal za eutrofikaciju, a također smanjuje probavljivost proteina i povećava izlučivanje N.

### ***Nusproizvodi kao hrana za akvakulturu***

#### ***Nusproizvodi prerade ribe***

Svake godine odbačeni ulovi iz svjetskog ribarstva čine 25 % ukupne proizvodnje morskog ribarstva. Ta količina premašuje 20 milijuna tona u svijetu i 5 milijuna tona godišnje u EU-u (Shahin i sur., 2023). Otprilike 25-35% ribljeg brašna dolazi od nusproizvoda prerade ribe, a otprilike 70% dolazi iz ribarstva. Prikupljanje nusproizvoda prerade ribe općenito se ne smatra ekonomski održivim zbog logističkih i tehničkih ograničenja (Sarker, 2023).

Najvažnija metoda zbrinjavanja ovih nusproizvoda je njihova upotreba u formulacijama hrane za stoku i vrste akvakulture. Prema Uredbi EU-a 1069/2009, riba i nusproizvodi akvakulture klasificirani su kao nusproizvodi kategorije 3, koje je dopušteno uključiti u prehranu životinja kako bi odgovorno doprinijeli održivosti okoliša i javnom zdravlju (Gasco i sur., 2020). Odbačeni nusproizvodi ribarstva mogu se upotrebljavati u proizvodnji FMFO-a (Li i sur., 2019). *Enzimski hidrolizati* ribarskog otpada još je jedna tehnika za preradu otpada u hidrolizate ribljih bjelančevina (Gasco i sur., 2020).

U studiji (Warwas, 2023) u hrani za kalifornijsku pastrvu korištena su tri različita nusproizvoda prerade ribe (fileti i ostaci obrade) bez odvajanja frakcija masti i proteina. Rezultati su pokazali da o uvjetima skladištenja i preradi ovisi mogu li se nusproizvodi koristiti kao izravni sastojci.

Uključivanje 50% svježih ostataka prerade inćuna u hranu rezultiralo je povećanim rastom, poboljšanim unosom hrane i održavanjem zdravlja crijeva. Međutim, postoje i nedostaci korištenja ovih nusproizvoda kao što su vrijednosti proteina i esencijalnih aminokiselina, higijenski problemi, rok trajanja proizvoda i zabrana koju nameće EU [Uredba (EZ) br. 1069/2009, kojom se sprječava hranjenje nusproizvodima iste vrste u akvakulturi (Gasco i sur., 2020).

### **Otpad od hrane**

Otpad od hrane može se koristiti i kao izvor bjelančevina u proizvodnji hrane za akvakulturu (Shahin i sur., 2023). Otpad od hrane uključuje sirove i kuhane prehrambene materijale, kao i reciklirane ostatke hrane. Procjenjuje se da se godišnje proizvede oko 1,5 milijardi tona ostataka hrane za ljude, što je ekvivalentno jednoj trećini ukupne godišnje proizvodnje. Iako nisu prikladni za sve vrste akvakulture, ovaj otpad od hrane može se koristiti za neke omnivorne vrste, kao što je tilapija (Nasser i sur., 2018) i druge vrste niske trofičke razine, kao što su amur i cipal (Mo i sur., 2014). Međutim, kao dio načela "predostrožnosti" koje se primjenjuje u politici sigurnosti hrane EU-a, upotreba otpada od hrane za ribe ili rastuće kukce nije dopuštena (Fowles i Nansen, 2020).

### **Jednostanični organizmi/proteini**

Mikroorganizmi, uključujući mikroalge, morske alge (makroalge), kvasce, gljive, bakterije i druge alternativne komponente, imaju značajan potencijal u hrani za akvakulturu zbog svojih proteina/aminokiselina, lipida ili omega-3 izvora. Sa sve većom upotrebom ovih mikroorganizama u akvakulturi, zajedno s tehnološkim inovacijama, također će biti moguće smanjiti ekološki otisak hrane za akvakulturu (Sarker, 2023). Ti se organizmi mogu smatrati održivim izvorom hrane jer brzo rastu, koriste vrlo malo slatke vode i ne zahtijevaju nikakvo poljoprivredno zemljište za svoju reprodukciju (Albrektsen i sur., 2022).

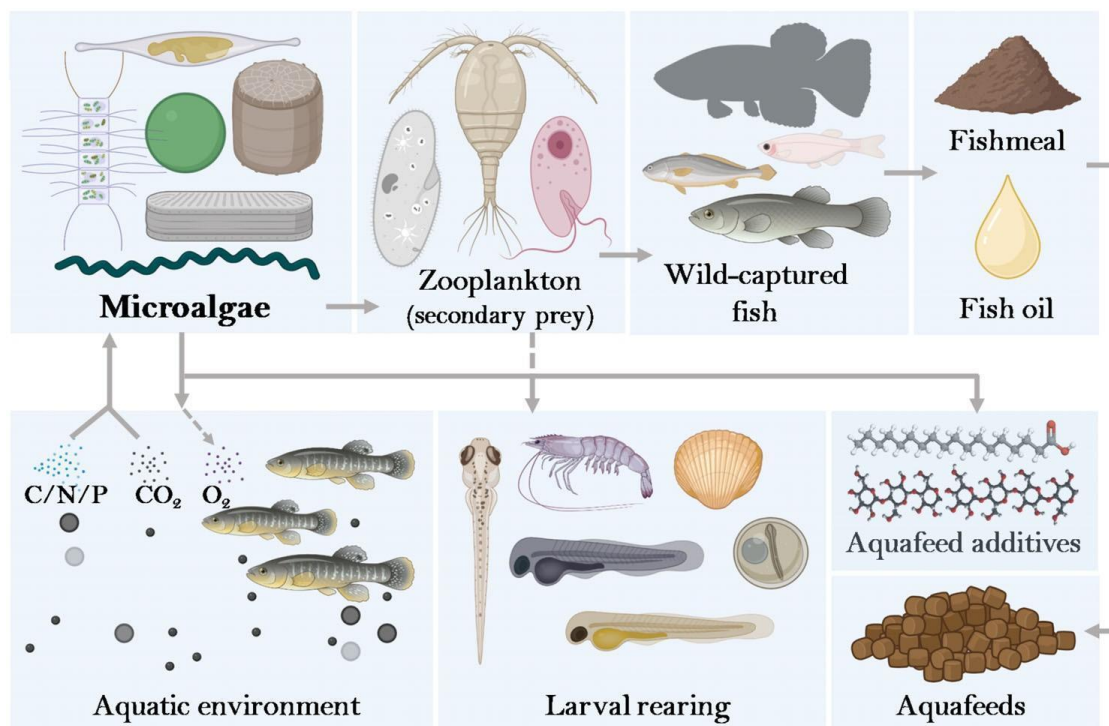
### **Mikroalge (fitoplankton)**

U akvakulturi mikroalge igraju važnu ulogu i zbog svojih učinaka na vodeni okoliš i zbog svoje uloge kao izvora hranjivih tvari (Wu i HU, 2023). Vrste mikroalgi čine manje od 1% Zemljine fotosintetske biomase, ali ipak doprinose približno 50% globalne biogene fiksacije ugljika (Field i sur., 1998). To je zato što se globalna populacija fitoplanktona obnavlja u prosjeku svakih 2 do 6 dana (Behrenfeld i sur., 2006). Osim toga, mikroalge su bogate omega-3 PUFA, karotenoidima, esencijalnim aminokiselinama,  $\beta$ -1-3-glukanom, mineralima i vitaminima.

Bjelančevine i ulje mikroalgi također mogu zamijeniti FMFO u hrani za akvakulturu. Sadržaj sirovih proteina u mikroalgama kreće se od 50% do 70% (Nagappan i sur., 2021; Ma i Hu, 2023). Budući da mikroalge mogu sintetizirati sve aminokiseline de novo, njihovi aminokiselinski profili bili su dobro uravnoteženi za hranu za vodene životinje (Becker i sur., 2013). Ukupni sadržaj lipida u mikroalgama može doseći i 45-60% težine suhih stanica (Ahmad i sur., 2022). Mikroalge mogu sintetizirati de novo omega-3 masne kiseline, koje također mogu zadovoljiti potrebe esencijalnih masnih kiselina u akvakulturi.

Pojavom industrijske proizvodnje mikroalgi ubrzala se njihova upotreba u hrani za akvakulturu. Među morskim mikroalgama, *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis* sp. i *Schizochytrium* sp. smatraju se obećavajućim kandidatima za upotrebu u hrani za akvakulturu. Navodi se da je *Isochrysis* sp.

mikroalge mogu biti dobra alternativa FMFO-u u prehrani kalifornijske pastrve i mogu se koristiti kao dodaci omega-3 i DHA u prehrani (Sarker i sur., 2020). Nedavno su neke tvrtke za stočnu hranu u akvakulturi počele proizvoditi ulje bogato DHA od *Schizochytrium* sp. za upotrebu u hrani za losose (Tocher i sur., 2020). Trenutačni iznimno visoki troškovi proizvodnje mikroalgi sprječavaju njihovu široku upotrebu u današnjoj akvakulturi (Nagappan i sur., 2021).



Slika 4.2. Uloge mikroalgi povezane s akvakulturom ([Biorender.com](https://www.biorender.com)) (Wu i Hu, 2023)

### Morske alge (makroalge)

Gotovo polovica globalne proizvodnje akvakulture morskih algi (tj. makroalgi) vrijedi više od 11 milijardi američkih dolara. Danas se više od 99% uzgoja morskih algi provodi u Aziji, sa značajnim rastom u Africi (FAO, 2020). Većina proizvedenih morskih algi su japanske alge (japanski wakame) i koriste se za prehranu ljudi.

Posljednjih godina morske alge su dobile na važnosti zbog svojih sposobnosti bioremedijacije, koje pružaju visoko održivu metodu proizvodnje. Sadržaj hranjivih tvari u morskim algama varira ovisno o vrsti morskih algi, kao što su crvene, zelene i smeđe, kao i o godišnjem dobu, s udjelom proteina u rasponu od 6% do 38% u crvenim algama, 3% do 35% u zelenim morskim algama i 2% do 17% u smeđim morskim algama. Također se navodi da su razine lipida u rasponima od <1–13%, <1–3%, odnosno <1–10% (Nagappan i sur., 2021). Većina vrsta ima proteine bogate esencijalnim aminokiselinama i sadrži velike količine esencijalnih omega-3 HUFA i PUFA. Sadržaj ugljikohidrata obično je najznačajnija komponenta (15–65%), ovisno o vrsti (Nagappan i sur., 2021). Količina sirovih vlakana, odnosno polisaharida, iznosi između 25-75% njegove suhe težine i mesojedi je ne mogu lako probaviti.

Općenito, navodi se da kada se cijele morske alge dodaju u hranu za ribe u maloj stopi (<10%) umjesto ribljeg brašna, dolazi do poboljšanja u učinku rasta i pigmentaciji ribe (Ragaza i sur., 2021). Međutim, kada se koristi iznad 10%, negativno utječe na performanse rasta i probavljivost hranjivih tvari (Qiu i sur., 2018). Da bi morske alge zamijenile riblje brašno kao alternativni izvor, moraju se podvrgnuti biorafiniranju kako bi izolirale i obogatile sadržaj proteina (Aasen i sur., 2022). Fermentacija se također predlaže kao još jedan obećavajući proces biorafiniranja morskih algi (Ang i sur., 2021). Ovi primjenjivi procesi još su u razvoju, a postojeći propisi EU-a (Uredba EU 68/2013) dopuštaju upotrebu samo biomase morskih algi proizvedene sušenjem i mljevenjem kao sastojka hrane za životinje bez posebnog odobrenja.

### Kvasci

Kvasci se smatraju alternativnim izvorom hrane za akvakulturu zbog visokog sadržaja sirovih bjelančevina (30-60%). U hrani za akvakulturu, uglavnom *Saccharomyces cerevisiae*, razni *Aspergillus* i *Fusarium venenatum*, kao i drugi sojevi kao što su *Candida utilis*, *Candida*, *Hansenula*, *Pichia*, *Torulopsis* i *Kluyveromyces marxianus* mogu se koristiti kao proteinske komponente (Jones i sur., 2020; Glencross i sur., 2020). Kvasac, uglavnom *Saccharomyces cerevisiae*, pokazao je pozitivne rezultate stvarajući korisnu imunostimulacijsku aktivnost, uglavnom kada djelomično zamjenjuje riblje brašno u prehrani lososa. Morski kvasac (*C. sake*) sadrži 55% proteina i značajne razine omega-3 masnih kiselina. Osim toga, probavljivost kod *C. sake* u kalifornijskoj pastrvi također je visoka i može se koristiti u dijetalnim formulacijama do 20% ukupnog sadržaja bez izazivanja štetnih učinaka (Warwas, 2023).

### Bakterije

Bakterije imaju prednost brzog rasta na organskim supstratima kao što su metan, metanol, ugljični dioksid i šećeri (Matassa i sur., 2020). Neki bakterijski sojevi mogu se koristiti za proizvodnju vrlo visokog sadržaja sirovih proteina (približno 60% do 82% težine suhe tvari) i razine esencijalnih aminokiselina (Ritala i sur., 2016). Bakterijski obrok sadrži do 80% sirovih proteina (prosječno = 60%) i približno 10% masti, slično ribljem brašnu (Albrektsen i sur., 2022). Nedavno je utvrđeno da uključivanje purpurnih nesumpornih bakterija kao što su *Rhodopseudomonas palustris* i *Rhodobacter capsulatus*, novi izvor mikrobnih proteina u nastajanju, poboljšava performanse rasta, omjer konverzije hrane i otpornost na bolesti i stres kod kozica (Alloul i sur., 2021). Nadalje, purpurne fototrofne bakterije proizvedene korištenjem otpadnih voda mogu se koristiti u količinama do 66% ribljeg brašna u prehrani brancina bez ikakvih štetnih učinaka na performanse riba (Delamare-Deboutteville i sur., 2019).

Iako su bakterijski proteini privlačni za buduću hranu za akvakulturu, suočavaju se s izazovima kao što su visoki troškovi proizvodnje i ograničeno globalno prihvaćanje za riblju hranu (Sarker i sur., 2023).

### Kukci u prehrani za akvakulturu

Industrija hrane za akvakulturu traži alternative FMFO-u. U tom kontekstu, kukci mogu biti održivi izvor proteina za akvakulturu koristeći otpad od hrane. Utvrđeno je da najmanje 16 od približno 1 milijun poznatih vrsta kukaca diljem svijeta može poslužiti kao alternativni izvori proteina u

akvakulturi (Guerreiro i sur., 2020). Osmam vrsta kukaca pokazalo je povoljne rezultate (Alfiko i sur., 2022). Među njima su najvažnije vrste kukaca kao što su svilena buba (*Bombyx mori*), *Hermetia illucens*, *Musca domestica*, *Tenebrio molitor* i cvrčci. Navodi se da ove vrste kukaca imaju visoku sirovinu bjelancevinu u rasponu od 42-60% i da su usporedive s ribljim brašnom i sojinim brašnom u smislu esencijalnih aminokiselina (Allegretti i sur., 2017). Prednost hrane na bazi kukaca nije samo količina hranjivih tvari koje sadrže, već i njihov smanjeni utjecaj na okoliš, što se pripisuje visokoj učinkovitosti pretvorbe otpada i pretvaranja nusproizvoda u vrijedne izvore hrane.

U studiji je utvrđeno da se muha morskih algi (*Coelopa frigida*) može uzgajati u otpadnim vodama farme morskih algi koja proizvodi smeđe morske alge i da ličinke morskih algi mogu zamijeniti 40% ribljeg brašna u prehrani bez izazivanja štetnih učinaka na rast i zdravlje crijeva kalifornijske pastrve (Warwas, 2023). Prehrana s različitim razvojnim fazama kukaca, kao što su ličinke, kukuljice i odrasli, testirana je u studijama. Utvrđeno je da se muha crnog vojnika može koristiti kao obrok posebno za kalifornijsku pastrvu (*Oncorhynchus mykiss*) i atlantskog lososa (*Salmo salar*) (Lock i sur., 2018).

Europska komisija odobrila je i uključivanje kukaca u prehranu vodenih organizama (Uredba 2017/893/EZ, 2017). Kao rezultat toga, u Europi su osnovana mnoga poduzeća za uzgoj različitih vrsta kukaca (Mancuso i sur., 2019).

### ***Niskotrofične morske životinje***

Morske životinje od posebnog interesa zbog njihove potencijalne upotrebe kao zamjene za FMFO uključuju *dagnje*, *amfipode* i *polihete*. Ovi niskotrofični organizmi dobivaju hranjive tvari od primarnih proizvođača kao što su fitoplankton, bakterije i alge, kao i organski otpad u morskom okolišu.

Dagnje, kao što su zelena (*Perna viridis*) i plava (*Mytilus edulis*), mekušci su koji se hrane filtrom i trenutno čine približno 56% ukupne proizvodnje morskih životinja u akvakulturi (FAO, 2020). Dagnje se mogu opisati kao bioremedijatori koji uspijevaju u okolišu bogatom hranjivim tvarima, pretvarajući otpadne hranjive tvari u proteine bez dodatne hrane. Sadrže 50-70% proteina i 5-16% lipida po suhoj težini, slično ribljem brašnu (Jusadi i sur., 2021). Primarni rizik povezan s korištenjem dagnji kao hrane je njihova visoka akumulacija teških metala (Rasidi i sur., 2021).

Morski amfipodi su red malih, uglavnom bentoskih rakova s više od 10.000 zabilježenih vrsta. Imaju potencijal poslužiti kao alternativni izvor žive hrane za glavonošce, kozice i morske konjice, kao i djelomična zamjena za riblje brašno u akvakulturi riba i školjkaša (Ashour i sur., 2021). Morski amfipodi sadrže visoku razinu proteina, PUFA (EPA, DHA) i aminokiselina.

Mnogočetini su globalno rasprostranjeni bioremedijatori koji se hrane na dnu i konzumiraju alge i raspadajuću organsku tvar, pretvarajući ih u vrijedne hranjive tvari. Mnogočetini su značajan izvor hrane za komercijalno važne ribe i rakove (Khan i sur., 2018). Tradicionalno se koriste kao živi ribarski mamac ili kao visokokvalitetni izvor hrane za posebne dijetete (Pombo i sur., 2020). Sadrže velike količine proteina (55-60% suhe mase), lipida (12-28% suhe mase) i PUFA, popraćene dobro uravnoteženim aminokiselinskim, vitaminskim i mineralnim profilima (Wang i sur., 2019).

|                               | Nutritional<br>Composition | Sustainability |          |        | Consumer<br>Perception | Commercial<br>Feasibility |
|-------------------------------|----------------------------|----------------|----------|--------|------------------------|---------------------------|
|                               |                            | Environmental  | Economic | Social |                        |                           |
| F & A<br>by-products          | ↑                          | ↑              | ↑        | ↑      | ↑                      | ↑                         |
| Food wastes                   | ↓                          | ↑              | ↓        | ↓      | ↓                      | ↓                         |
| Insects                       | ↑                          | ↑              | ↑        | ↑      | ↔                      | ↑                         |
| SCO                           | ↑                          | ↑              | ↓        | ↑      | ↑                      | ↓                         |
| Seaweed                       | ↓                          | ↑              | ↑        | ↑      | ↑                      | ↑                         |
| Low-trophic<br>marine animals | ↑                          | ↑              | ↑        | ↑      | ↑                      | ↔                         |

Sl.4.3. Procjena kvalitativnog potencijala alternativnih sastojaka za hranu za akvakulturu (prilagođeno iz Shahin et al., 2023)

## 2.2. Smanjenje utjecaja hrane za životinje za akvakulturu na okoliš

U sektoru akvakulture hrana za životinje čini otprilike 40-60% troškova, a bjelančevine (riblje brašno) su najskuplja hranjiva tvar. 70% FMFO-a koji se koristi za zadovoljavanje potreba vodenih organizama dolazi iz ribolova. Ta situacija stvara znatan pritisak na ribarstvo i negativno utječe na njegovu održivost.

### 2.2.1. Pitanja akvakulture i održivosti

Pitanja akvakulture i održivosti mogu se kategorizirati u tri glavna područja: ekonomska, ekološka i socijalna održivost (Odeja, 2021). Ključne strategije za mjerenje prehrambene i okolišne održivosti u akvakulturi mogu se temeljiti na tri glavna kriterija (Sarker i sur., 2023)

1. *Probavljivost sastojaka hrane za životinje*: Probavljivost sastojaka hrane za akvakulturu važan je parametar za formuliranje ekonomski i ekološki održive hrane za životinje. Potrebno je utvrditi probavljivost sastojaka. Tako se mogu smanjiti troškovi hrane, onečišćenje hranjivim tvarima kao što su emisije eutrofikacijske emisije fosfora i dušika, a poboljšati se stopa pretvorbe hrane za životinje.
2. *Omjer konverzije hrane za životinje (FCR)*: Ekonomska prednost održive proizvodnje hrane za životinje koja koristi alternativne sastojke uglavnom je posljedica nižeg FCR-a. FCR je dobar

pokazatelj ekološke učinkovitosti akvakulture jer ukazuje na moguće negativne posljedice proizvodnje otpadnog fosfora i dušika u vodnom okolišu, kao što su eutrofikacija, staklenički plinovi, gubitak biološke raznolikosti i utjecaji na druge ekosustave. Međutim, FCR-ovi u akvakulturi smanjili su se s približno 3 na oko 1,35 u akvakulturi i s približno 2–2,25 na oko 0,9–1,2 u uzgoju lososa, uglavnom zbog poboljšanja u formulacijama hrane za životinje od 1970. (Sarker i sur., 2023).

3. *Procjena životnog ciklusa (LCA) za mjere utjecaja na okoliš*: LCA se može koristiti za mjerenje utjecaja prehrambenih sustava na okoliš, uključujući akvakulturu. Mogu se procijeniti kategorije utjecaja na okoliš, uključujući održivi razvoj hrane za životinje, korištenje alternativnih sastojaka, učinkovito korištenje resursa kao što su zemlja, voda i gnojivo, emisije globalnog zatopljenja, emisije eutrofikacije, gubitak biološke raznolikosti i negativne vanjske učinke poput zakiseljavanja oceana (Sarker i sur., 2011). Potrebno je vidjeti LCA utjecaje visokokvalitetne proizvodnje novih proteina i masti na FMFO u hrani za životinje.

### **Održivost proizvodnje hrane za vodene organizme**

Proizvodnja hrane za životinje čini najznačajniji dio ekološkog i ekonomskog otiska modernih operacija akvakulture; stoga se održiva akvakultura može postići samo korištenjem održive hrane za životinje (Warwas, 2023). Nove smjernice Europske komisije uključuju akvakulturu kao dio strategije EU-a "od polja do stola", čiji je cilj ubrzati prijelaz na održivi europski prehrambeni sustav. U strategiji se ističe potencijal održive akvakulture za osiguravanje hrane i prehrane za životinje s niskim ugljičnim otiskom, uz istodobno stvaranje gospodarskih prilika i radnih mjesta (Odeja, 2021). Osim toga, Komisija preporučuje proizvođačima hrane za životinje da ograniče svoje oslanjanje na FMFO iz divljih stokova i umjesto toga upotrebljavaju alternativne proteinske sastojke kao što su alge, kukci ili otpad iz drugih industrija. Međutim, danas se većina komercijalne hrane za akvakulturu sastoji od FMFO-a. Očekuje se da bi potražnja za FMFO-ima mogla premašiti ponudu manje ribe već 2037. godine. To znači da industrijska hrana za životinje nije dugoročno održiva u komercijalnim razmjerima (Smárasón, 2023). Kako bi se zaštitili morski ekosustavi i smanjilo iscrpljivanje oceanskih resursa, hrana za akvakulturu mora biti održiva. Iako glavni alternativni sastojci hrane za životinje u akvakulturi uključuju hranu na bazi soje i kukuruza, njihova je proizvodnja kritizirana jer je neodrživa i slabo probavljiva. Stoga kružno biogospodarstvo dobiva na važnosti za budućnost industrije hrane za životinje u akvakulturi (Bunting, 2021).

## **3. Prakse upravljanja prehranom**

### **3.1. Tehnike preciznog hranjenja**

Inovativni pristupi, kao što su fleksibilne formulacije sastojaka, enzimi, optimizirani mikrobiomi i genetika, igraju ključnu ulogu u približavanju mnogih vrsta akvakulture preciznoj prehrani. Precizno hranjenje uključuje formuliranje hrane za otključavanje potencijala DNK, mikrobioma i metaboličkih odgovora riba i rakova, čime se sprječavaju bolesti i promiče učinkovit rast (Howell, 2022).

### ***Hranjenje temeljeno na mikrobiomu***

Mikrobiom je još uvijek nešto poput 'crne kutije' u prehrani u akvakulturi. Tijekom posljednjih pet godina došlo je do značajnog porasta znanstvenih studija koje ispituju crijevni mikrobiom u kontekstu akvakulture. Nove tehnologije genetskog sekvenciranja omogućile su mapiranje mikrobnih zajednica koje žive u crijevima više od 20 vrsta uzgojenih riba. U budućnosti će profiliranje sastava crijevnih mikrobnih zajednica, posebno njihovih funkcija ili funkcionalnih ishoda u crijevima, biti područje za daljnja istraživanja. Ovaj pomak će rasvijetliti tekuća istraživačka pitanja kao što je veza između mikrobne raznolikosti i proizvodnje metabolita. Omogućit će industriji da uspostavi osnovne metrike za zdravlje crijeva. Usredotočenost na funkciju crijevnog mikrobioma također će dovesti do poboljšanja probavljivosti hranjivih tvari i performansi riba (Howell, 2022). U okviru sjecišta genetike i prehrane, genetska selekcija u akvakulturi sada ne cilja samo na otpornost na bolesti i poboljšani rast, već i na korištenje hranjivih tvari. To će precizne tehnike hranjenja temeljene na njihovim genetskim karakteristikama učiniti još važnijima.

### ***Formulacija hrane za životinje na bazi neto energije***

Sljedeća faza precizne prehrane nadilazit će zamjenu FMFO-a iz ribarstva alternativama i uključivat će korištenje svih sastojaka hrane na fleksibilan i održiv način. U akvakulturi se formulacija hrane uglavnom temelji na probavljivoj energiji (DE). U ovom se sustavu pretpostavlja da se energija koristi na standardni način za rast. Glavni razlog za to je što je teško točno izmjeriti gubitak energije bez fekalija kod riba u usporedbi s kopnenim životinjama. Stoga se može utvrditi da će korištenje metabolizirajućih vrijednosti energije (ME) i neto energije (NE) umjesto vrijednosti DE za hranu za akvakulturu pružiti značajne prednosti (Groot i sur., 2021.). Kako bi se ovaj pomak ostvario i održivije koristili sastojci hrane, industrija bi mogla usvojiti formulacije hrane za životinje koje se usredotočuju na *neto energiju*, a ne na *probavljivu* energiju. Ključna razlika između ova dva sustava je u tome što probavljivi energetska sustav pretpostavlja da ribe koriste sve prehrambene makronutrijente na isti način. Nasuprot tome, neto energetska sustav pretpostavlja da se proteini, masti i ugljikohidrati u ribljoj prehrani koriste različito. Posljednjih godina nutricionisti za akvakulturu postigli su značajan napredak u razvoju modela neto energije za različite vrste riba (Howell, 2022).

Budući da je utjecaj hrane za životinje na okoliš prvenstveno određen njezinim sastojcima, postoji mogućnost smanjenja utjecaja akvakulture na okoliš formuliranjem hrane za životinje s manjim utjecajem na okoliš (Wilfart i sur., 2023). U nekim studijama potencijalni utjecaji hrane za životinje na okoliš razmatrani su u formulaciji hrane za životinje (Mackenzie i sur., 2016). Formuliranje hrane za životinje u skladu s ekološkim i ekonomskim kriterijima može se smatrati inovativnim pristupom rješavanju trenutnih izazova stočarske proizvodnje (Garcia-Launay i sur., 2018).

#### ***3.1.3. Višeciljna (MO) formulacija hrane za životinje***

Formulacija MO hrane, čiji je cilj uspostaviti ravnotežu između nižih troškova i smanjenih utjecaja na okoliš, može se smatrati obećavajućim rješenjem za ublažavanje ekološkog otiska proizvodnje u akvakulturi (Wilfart i sur., 2023). Garcia-Launay i sur., (2018) su razvili *formulaciju s više ciljeva (MO)* koja koristi ograničenja formulacije s najjeftinijim troškovima (stope dodavanja hranjivih tvari i sastojaka hrane) i izračunava funkciju MO koja uključuje i troškove hrane za životinje i pokazatelje utjecaja na okoliš dobivene LCA (tj. klimatske promjene, korištenje neobnovljive energije, potražnja

P, zauzimanje zemljišta). Međutim, na rast ribe može značajno utjecati vrsta sirovih sastojaka hrane. Na primjer, zamjena svih FMFO-a sirovim biljnim sastojcima smanjila je rast kalifornijske pastrve za 30% (Lazzarotto i sur., 2018). Razvijena je metoda formulacije hrane za životinje s više ciljeva koja uzima u obzir i troškove i utjecaje na okoliš (procijenjene LCA) krmne smjese. U prvom koraku, formulacija s najnižim troškovima pruža osnovnu vrijednost za troškove hrane za životinje i potencijalne učinke po kilogramu hrane za životinje. U drugom, minimizirana funkcija MO uključuje normalizirane vrijednosti troškova hrane i utječe na klimatske promjene, potražnju za P, potražnju za neobnovljivom energijom i zauzimanje zemljišta. Dodatni čimbenik odmjerava relativni utjecaj ekonomskih i okolišnih ciljeva.

Potencijal metode pripreme MO hrane procijenjen je korištenjem dva scenarija formulacije hrane za svinje, brojlere i mlade bikove. U usporedbi s osnovnom hranom, utvrđeno je da MO formulirana hrana ima manji utjecaj na okoliš (od –2 do –48%) i umjereno višu cijenu (1–7%) u oba proučavana scenarija, osim za zauzimanje zemljišta za brojlere. Razvijena metoda nadopunjuje druge strategije i trebalo bi je istražiti u budućnosti kako bi se optimizirao cijeli sustav životinjske proizvodnje kako bi se značajno smanjili povezani učinci (Garcia-Launay i sur., 2018). Formulacija MO može se koristiti kao vrijedan alat za smanjenje ekološkog otiska proizvodnje akvakulture bez ugrožavanja performansi životinja ili nužnog povećanja troškova proizvodnje (Wilfart i sur., 2023).

### 3.2. Tehnologije prethodne obrade i fermentirana hrana za životinje za hranidbu u akvakulturi

Biljna hrana se često koristi kao primarni izvor proteina u hrani za akvakulturu zbog svoje široke dostupnosti i niske cijene. Međutim, obično sadrže visoke razine neškrobnih polisaharida (NSP), koji ograničavaju njihovu upotrebu, posebnu hrani za ribe mesojede. Također, nisu ukusne, imaju neuravnotežene profile aminokiselina i sadrže antinutritivne čimbenike (ANF), koji ograničavaju njihovu upotrebu i povećavaju proizvodnju otpada. Stoga je učinkovita upotreba ovih sastojaka u akvakulturi od velikog interesa.

Fermentacija hrane za životinje isplativ je tehnološki proces koji može smanjiti razinu ANF-ova uz poboljšanje probavljivosti hranjivih tvari i proizvodnje različitih bioaktivnih spojeva, povećavajući nutritivnu vrijednost sastojaka hrane u hrani za akvakulturu. Fermentaciju u čvrstom stanju prvenstveno karakterizira upotreba mikroorganizama, poput nitastih gljivica, koji učinkovito prodiru u supstrat kroz nisku razinu slobodne vode i rast hifa (Šelo i sur., 2021). Stoga se može fermentirati mikroorganizmima kao što su *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* i *Bacillus licheniformis* i koristiti u fermentaciji u čvrstom ili vlažnom stanju. Ovi organizmi mogu utjecati na hranu proizvodeći različite enzime, uključujući fitaze, lipaze, proteaze i karbohidraze kao što su celulaze i ksilanaze. Gljive se posebno definiraju kao obogaćivanje lignoceluloznih materijala mikrobnim proteinima i enzimima. Na taj se način smanjuje sadržaj sirovih vlakana. Nasuprot tome, povećane su sirove bjelančevine, topljivost bjelančevina te probavljivost bjelančevina i vlakana (Godoy i sur., 2018), čime se povećava nutritivna vrijednost biljne hrane za životinje za upotrebu u akvakulturi. Ako se želi stvoriti fermentirana hrana u čvrstom stanju,

fermentirana smjesa se ostavi da se osuši na temperaturi i u okruženju koje neće oštetiti hranjive tvari (Vieira i sur., 2023; Zengin i sur., 2022).

#### 4. Ublažavanje učinaka zakiseljavanja oceana

Oceani su prirodni karbonatni puferski sustavi koji djeluju kao ugljični ponor u okolišu, koji je znatno veći od atmosferskog i kopnenog sadržaja ugljika. Ocean je izvrstan tampon za neutralizaciju malih promjena u svom sastavu. Kako se više atmosferskog CO<sub>2</sub> otapa u oceanskoj vodi, ugljik se oslobađa iz oceanskoga, čineći oceane kiselijima (Ebenezer i sur., 2023). Oceani apsorbiraju CO<sub>2</sub> iz atmosfere, djelujući kao tampon za atmosferske razine CO<sub>2</sub>. Ako oceani apsorbiraju više CO<sub>2</sub>, to dovodi do smanjenja pH morske vode, koncentracije karbonatnih iona i koncentracija minerala kalcijevog karbonata (CaCO<sub>3</sub>), stvarajući situaciju poznatu kao "zakiseljavanje oceana" (Reid i sur., 2019).

Budući da će doći do istodobnog povećanja CO<sub>2</sub> (smanjeni pH i zasićenost aragonitom) i temperature, zajedno s promjenama saliniteta i, u nekim slučajevima, dolazi do smanjenja razine kisika (Boyd i sur., 2015). Zakiseljavanje oceana i temperatura su međusobno povezani. S obzirom na potencijal za negativne sinergije, povećanje temperature smatra se "zlim blizancem" zakiseljavanja oceana. Povećanje razine kiselosti u morskoj vodi također negativno utječe na fiziologiju i metabolizam vodenih vrsta narušavajući mehanizme međustaničnog transporta. Zabilježeno je da ličinke izložene morskoj vodi s nižim pH pokazuju niži pH želuca, što rezultira smanjenom probavnom učinkovitošću i povećanom konzumacijom hrane (Stumpp i sur., 2013). Topli klimatski uvjeti također bi iscrpili kisik u vodi, što bi rezultiralo smanjenjem fitoplanktona. Plankton ima važnu ulogu u ublažavanju svjetske klime apsorpcijom emisija CO<sub>2</sub>. Fitoplankton čini otprilike polovicu globalne fotosinteze i igra ključnu ulogu u ublažavanju globalnog zatopljenja (Huertas i sur., 2011).

##### 4.1. Puferska sredstva za ublažavanje zakiseljavanja oceana

Uključivanje puferskih sredstava u formulacije hrane za životinje pomaže u suzbijanju učinaka zakiseljavanja oceana na probavnu fiziologiju vrsta u akvakulturi. Puferska sredstva u formulacijama hrane za životinje neutraliziraju ili stabiliziraju pH u probavnom traktu, pružajući optimalne uvjete za apsorpciju hranjivih tvari.

Puferska sredstva su:

- *Alge* smanjuju zakiseljavanje oceana i neutraliziraju emisije. *Morske alge*, uključujući kelpove, također smanjuju zakiseljavanje oceana uklanjanjem ugljičnog dioksida iz vode i djeluju kao lokalno sredstvo za 'puferiranje' koje koristi mnogim morskim vrstama. Morske alge također proizvode otopljeni kisik, smanjujući širenje 'mrtvih zona' u vodi. Uzgoj morskih algi velikih razmjera također se istražuje kao sredstvo za uklanjanje i sekvestraciju ugljičnog dioksida iz dubokog oceana (NOAA Fisheries, 2022).
- *Anorganski puferi*: To su obično spojevi kao što su natrijev bikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>), kalcijev karbonat (CaCO<sub>3</sub>) ili magnezijev hidroksid (Mg(OH)<sub>2</sub>), koji se obično koriste za održavanje pH stabilnosti.

- *Organski puferi*: Spojevi kao što su soli limunske kiseline (kao što je natrijev citrat) ili organske kiseline (kao što su mravlje ili mliječne kiseline) također su potencijalni puferški agensi. Obično su specifičniji u svom puferском kapacitetu i također mogu podržati zdravlje crijeva utječući na mikrobne zajednice.
- *Fitokemikalije i puferi na biljnoj bazi*: Neke biljke proizvode spojeve koji mogu prirodno puferirati razinu pH i pružiti dodatne prednosti kao što su antioksidativna svojstva ili protuupalni učinci. Oni mogu biti korisni u organskim ili održivim sustavima akvakulture.

Zaključno, uključivanje puferških sredstava u formulacije hrane za akvakulturu predstavlja obećavajuću strategiju za ublažavanje učinaka zakiseljavanja oceana. Ovaj pristup ne samo da podržava zdravlje i rast uzgojenih vrsta, već i povećava otpornost sustava akvakulture na klimatske promjene.

#### 4.2. Prehrambene strategije za ublažavanje zakiseljavanja oceana

U akvakulturi je poboljšanje otpornosti na kisele uvjete ključno pitanje, posebno u kontekstu zakiseljavanja oceana, kako bi se razvile učinkovite strategije hranjenja za održivu akvakulturu (Parker i sur., 2024). To može imati negativan utjecaj na morski život, posebno vrste koje se oslanjaju na stabilne pH razine za optimalan rast, razvoj i zdravlje, kao što su ribe, školjkaši i rakovi. Treba razviti strategije hranjenja koje povećavaju izdržljivost, zdravlje i otpornost na stres.

Neke strategije hranjenja za ublažavanje zakiseljavanja su:

1. **Upotreba minerala.** U kiselim uvjetima dostupnost kalcija i magnezija u vodi može se smanjiti, a ti su minerali neophodni za održavanje integriteta oklopa i školjki kod mekušaca i rakova. Nizak pH može utjecati na topljivost elemenata u tragovima u vodi, pa njihovo dodavanje u hranu može podržati zdravlje riba i školjakaša. Stoga dodavanje visoko bioraspoloživih oblika kalcija i magnezija u hranu može pomoći ovim vrstama da dobro održavaju svoje ljuske i pravilno rastu.

2. **Upotreba vitamina.** U stresnim uvjetima, kao što je zakiseljavanje, ribe i školjkaši mogu doživjeti oksidativni stres, koji se može ublažiti odgovarajućim dodavanjem vitamina C. u hranu. Vitamin E snažan je antioksidans koji pomaže u zaštiti stanica od oksidativnog oštećenja uzrokovanog stresorima iz okoliša, uključujući zakiseljavanje. Vitamini B skupine, kao što su B1 (tiamin), B2 (riboflavin) i B12 (kobalamin), igraju važnu ulogu u metabolizmu energije, funkciji živčanog sustava i ukupnoj toleranciji na stres.

3. **Esencijalne aminokiseline i masne kiseline.** U stresnim uvjetima uzrokovanim zakiseljavanjem oceana, metabolizam i sinteza proteina u tijelima životinja akvakulture mogu se promijeniti. Dodavanje aminokiselina kao što su metionin, lizin i treonin u prehranu može pomoći u održavanju rasta, obnavljanju tkiva i imunološkim odgovorima u ovim stresnim uvjetima, koji su neophodni za smanjenje upale, podršku imunološkoj funkciji i promicanje ukupnog rasta. Dopunjavanje prehrane u akvakulturi EPA i DHA može pomoći u ublažavanju nekih štetnih fizioloških učinaka zakiseljavanja.

4. **Probiotici i prebiotici.** Dodavanje korisnih mikroorganizama koji se izravno hrane može biti posebno važno u zakiseljenim vodama, gdje stres zbog promjena pH može dovesti do neravnoteže crijevnog mikrobioma ili oslabljenog imuniteta. Prebiotici također mogu poboljšati probavu i cjelokupno zdravlje hranjenjem korisnih bakterija u crijevima. Promicanjem zdravih mikrobioma, vrste akvakulture mogle bi se bolje nositi sa stresom iz okoliša.

5. **Antioksidansi i fitokemikalije.** U kiselim sredinama vrste imaju tendenciju nakupljanja reaktivnog kisika, što dovodi do oksidativnog stresa. Dodavanje prirodnih antioksidansa, kao što su karotenoidi i polifenoli, u hranu za životinje može pomoći u ublažavanju oksidativnog oštećenja i povećanju otpornosti.

## 5. Poboljšanje učinkovitosti i probavljivosti hrane

### 5.1. Obrada ekstruzijom

Ekstruzijska obrada je metoda koja se primjenjuje za kuhanje i pasterizaciju komponenti hrane ili hrane za životinje izlaganjem visokim temperaturama i pritiscima na kratko vrijeme, čime se eliminiraju svi ANF-ovi i povećava potrošnja hrane, probavljivost hranjivih tvari i, posljedično, rast ribe. Ovako ekstrudirani sastojci hrane potiču višu razinu lipida u hrani, želatinizaciju škroba i povećanje proteinske i energetske probavljivosti hrane. Ekstruzija je također bitna u proizvodnji akvakulture jer pozitivno utječe na fizička svojstva kao što su smanjena finoća, uzgon i potonuće.

### *Korištenje enzimskih aditiva*

Korištenje enzimskih aditiva za poboljšanje probavljivosti sastojaka hrane i poboljšanje apsorpcije hranjivih tvari, čime se maksimizira rast i zdravlje u promjenjivim uvjetima okoliša, ključno je za hranjenje u akvakulturi. Konkretno, dodavanje enzima u ekstrudiranu hranu za ribe kako bi se poboljšala probavljivost fosfora, ugljikohidrata i proteina može poboljšati održivost okoliša smanjenjem ispuštanja spojeva iz ribe u vodu. U tom kontekstu također je važno razviti hranu za životinje koja održava svoju probavljivost unatoč promjeni temperature vode, što se može dogoditi zbog visokih ili niskih temperatura vode povezanih s globalnim zagrijavanjem.

Kako se talište masnih kiselina u hrani povećava u uvjetima hladne vode, probavljivost se smanjuje, što negativno utječe na FCR. Taj je učinak mnogo izraženiji u hladnim vodama nego u toplim. Stoga je potrebno povećati opću probavljivost masti posebno lipazama (Howell, 2022). Enzimi proteaze mogu stimulirati endogene peptidaze poboljšavajući probavljivost proteina i hidrolizirajući proteinske antinutrijente kao što su lektini, inhibitori tripsina, antigeni proteini i antinutritivni alergeni proteini, uključujući glicinin,  $\beta$ -konglicinin i kafrin (Cowieson, 2008). Upotreba biljne hrane bogate NSP-ovima u probavnom traktu riba, enzima kao što su ksilanaze, glukanaze i celulaze, može povećati probavljivost i iskorištavanje hranjivih tvari koje pružaju alternativni sastojci (Sarker, 2023).

### 5.2. Funkcionalni dodaci hrani za životinje

Funkcionalni dodaci hrani za životinje su dodaci koji se ugrađuju u formulacije hrane za životinje kako bi se zadovoljili osnovni prehrambeni zahtjevi konvencionalne hrane za životinje, kao i poboljšali rast i zdravlje akvakulture. Njihova upotreba u formulaciji hrane za akvakulturu pruža

prednosti kao što su poboljšanje zdravlja crijeva i korisnih crijevnih bakterija, povećanje proizvodnje enzima i poticanje apetita, što zauzvrat dovodi do poboljšanih performansi rasta. Osim toga, ovi dodaci hrani za životinje mogu ublažiti negativan utjecaj akvakulture na okoliš poboljšanjem kvalitete vode i promicanjem upotrebe alternativnih proteina u hrani za akvakulturu (Onomu i Okuthe, 2024).

Korištenje kopnenih, biljnih proteina kao djelomične ili potpune zamjene za riblje brašno zahtijeva dodatke hrani. Antibiotici i kemoterapeutici koji se koriste u akvakulturi mogu dovesti do razvoja bakterijskih sojeva otpornih na antibiotike i eliminacije nenamjernih prirodnih mikroorganizama, kao i problema s ostacima antibiotika na bazi proizvoda kod ljudi. S druge strane, probiotici, prebiotici i fitogenici mogu se koristiti kao funkcionalni dodaci hrani za prevenciju ili smanjenje bolesti i jačanje imuniteta domaćina (Van Doan i sur., 2020). Međutim, dostupno je manje informacija o funkcionalnim dodacima hrani za životinje u akvakulturi nego drugim životinjama, posebno u pogledu njihova odnosa s održivošću akvakulture (Onomu i Okuthe, 2024).

Održive uloge funkcionalnih dodataka hrani za životinje na temelju njihovih pet glavnih učinaka na akvakulturu:

1. Povećana iskorištenost hrane za životinje
2. Poboljšano održivo korištenje resursa
3. Povećana otpornost na bolesti i imunitet
4. Povećana otpornost na parazite
5. Poboljšana kvaliteta vode

### ***Probiotici (DFM), prebiotici i simbiotici***

Korisni mikroorganizmi i prebiotički spojevi u hrani za životinje podržavaju zdravlje crijeva, jačaju imunitet i poboljšavaju ukupnu učinkovitost hrane za životinje suočeni sa stresorima povezanim s globalnim zatopljenjem.

#### ***Probiotici***

Probiotici su definirani kao dodaci živoj hrani koji imaju blagotvorne učinke poboljšavajući crijevnu mikrobnu ravnotežu kod životinja domaćina (Fuller, 1989). Te tvari doprinose rastu ili razvoju povećanjem potrošnje hrane, iskorištavanjem hrane ili utjecajem na imunološki sustav životinja (Demir i sur., 2003). Probiotici su globalno prihvaćeni funkcionalni dodatak hrani za životinje u akvakulturi. Iako postoje mnoge definicije probiotika, kao što su "živi mikroorganizmi koji, kada se primjenjuju u odgovarajućim količinama, daju zdravstvenu korist domaćinu", ove su definicije prikladne za kopnene životinje i ljude, ali ne i za vodene životinje. To je zato što vodene životinje i mikroorganizmi koegzistiraju u istom vodenom okolišu. Kod vodenih životinja interakcija između mikroorganizama (uključujući probiotike) i domaćina događa se ne samo u crijevnom traktu već i u okolnoj vodi (Onomu i Okuthe, 2024).

Bakterijski patogeni postaju sve otporniji na antimikrobne lijekove, pesticide i dezinficijense koji se koriste u kontroli vodenih bolesti. Iz tog razloga, proučavanje probiotika u akvakulturi je vrlo traženo kako bi se osigurala ekološki prihvatljiva, održiva akvakultura kao alternativa antibioticima. Nažalost, biljni sastojci mogu imati nekoliko štetnih učinaka na prehranu akvakulture (Nielsen i sur.,

2022). Probiotici stabiliziraju mikrobnu populaciju gastrointestinalnog trakta ribe eliminacijom patogenih mikroba i povećanom probavljivošću i bioraspoloživošću hranjivih tvari (Oscar i sur., 2020).

Bakterije, kvasac i alge intenzivno se koriste kao probiotici u akvakulturi. Učinci probiotika mogu se klasificirati u dvije skupine prema cilju liječenja (Nathanailides i sur., 2021):

- Parametri rasta i dobrobiti riba, uključujući učinke na rast riba i parametre pretvorbe hrane, crijevnu mikrobiotu i anatomiju, imunitet i otpornost na patogene.
- Parametri okoliša, uključujući ribnjake i/ili spremnike (kvaliteta vode, raznolikost vodene mikrobiote).

Brojni probiotički mikroorganizmi izolirani su i procijenjeni za upotrebu u akvakulturi za prevenciju i kontrolu zaraznih bolesti u vrstama akvakulture. Rezultati dviju studija koje su koristile dva komercijalna probiotika za procjenu učinaka probiotika na ženke matičnog jata kalifornijske pastrve (Akbari Nargesi i sur., 2020) i *nilsku tilapiju* (*Oreochromis niloticus*) (El-Kady i sur., 2022) pokazali su da probiotici mogu poboljšati reproduktivne parametre, smanjiti ukupni dušik i amonijak te povećati performanse rasta i iskorištenost hrane u usporedbi s kontrolom.

### **Prebiotici i simbiotici**

Prebiotici su neprobavljivi dodaci hrani, koji se uglavnom sastoje od oligosaharida koji stimuliraju i metaboliziraju korisne mikroorganizme u gastrointestinalnom traktu, istovremeno poboljšavajući zdravlje domaćina (Bozkurt i sur., 2014). Da bi se dodatak hrani za životinje kategorizirao kao prebiotik, mora doći do debelog crijeva bez probave, biti otporan na želučanu kiselost, hidroliziran probavnim enzimima i apsorbiran u gastrointestinalnom traktu (Davani-Davari i sur., 2019). Korisnost prebiotika kao dodataka hrani za životinje povezana je s nusproduktima dobivenim tijekom fermentacije bakterija u crijevima. Glavne vrste prebiotika koji se koriste u akvakulturi su manan oligosaharid (MOS), fruktooligosaharidi (FOS), galaktooligosaharidi (GOS), arabinoksilan oligosaharidi (AXOS), inulin i  $\beta$ -glukan.

Probiotici pomiješani s različitim sojevima probiotika ili prebioticima (*simbioticima*) rezultiraju boljim prednostima u smislu rasta i zdravlja u usporedbi sa samim probioticima/prebioticima. To je zato što se smatra da se upotreba više sojeva ili sinbiotika međusobno nadopunjuje, proširujući tako njihov spektar učinaka na domaćina (Puvanasundram i sur., 2021). Widanarni i sur. (2019) pokazali su da dodatak prehranbenih manan oligosaharida (MOS) putem *Artemia* sp. može značajno poboljšati aktivnosti probavnih enzima nakon ličinke, rast, preživljavanje i otpornost na infekciju *Vibrio harveyi*. Dodatak prehrani od 1,5 g kg  $\beta$ -1,3 glukana i fruktooligosaharida u pacifičkim bijelim kozicama (*Litopenaeus vannamei*) može biti učinkovit u poboljšanju performansi rasta i antioksidativnih aktivnosti te poboljšanju nespecifičnog imuniteta i otpornosti na bolesti (Eissa i sur., 2023).

### **Fitogenici**

Fitogenici su skupina dodataka hrani dobivenih iz lišća, stabljika, korijena, sjemenki, gomolja, plodova, grmlja i začina. Fitogenici općenito potiču apetit, jačaju korisne crijevne bakterije i koriste se kod domaćih životinja zbog svojih antioksidativnih, antimikrobnih, antikancerogenih, analgetskih

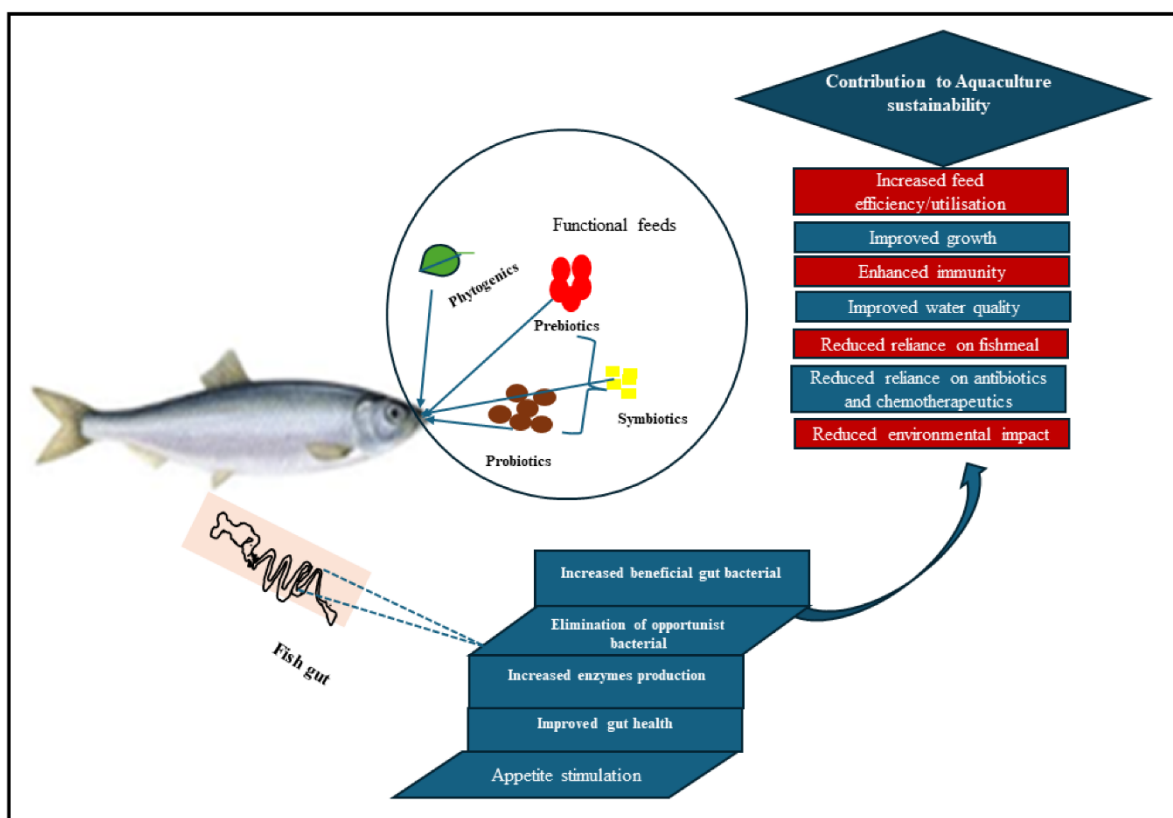
i antiparazitskih učinaka. Budući da sadrže aktivne spojeve, mogu imati i toksične učinke. Njihova svojstva i učinkovitost vrlo su varijabilni i razlikuju se ovisno o korištenom dijelu biljke, tehnici ekstrakcije, koncentraciji, sezoni berbe i zemljopisnom položaju (Onomu i Okuthe, 2024).

U studiji, dva fitogena aditiva za hranu, jedan bogat karvakrolom, a drugi bogat timelom, poboljšali su učinkovitost hrane u usporedbi s kontrolnom prehranom i povećali antioksidativne zaštitne kapacitete kod kalifornijske pastrve (*Oncorhynchus mykiss*) (Giannenas i sur., 2012). Također je regulirao crijevne mikrobne zajednice negativno utječući na ukupan broj anaerobnih. Studija Abdel-Latifa i sur., (2020) ispitala je primjenu dijetalnog esencijalnog ulja majčine dušice (OEO) na šarana (*Cyprinus carpio* L.). Kada se uspoređuju ribe hranjene OEO s kontrolnom skupinom, pokazali su značajno poboljšanje crijevnih morfometrijskih parametara. Ispitali su učinke kvercetina, eteričnog ulja majčine dušice i vitamina C na prehranu običnog šarana (*Cyprinus carpio*). Otkrili su da su ribe hranjene kvercetinom imale višu razinu antioksidansa u serumu i jetri, uključujući katalazu, superoksid dismutazu, glutation peroksidazu i glutation reduktazu, nakon 60-dnevnog ispitivanja hranjenja. Učinke ekstrakta mažurana na običnu šaransku ribu, *Cyprinus carpio*, ispitali su Yousef i sur., (2021). Maksimalna konačna masa, debljanje i specifična stopa rasta, kao i najniži FCR, viđeni su kada je u prehranu dodano 200 mg  $\text{kg}^{-1}$  ekstrakta mažurana.

### Antistresni dodaci hrani

Najvažniji učinak klimatskih promjena je stres koji će se stvoriti u akvakulturi zbog čimbenika okoliša. Posljednjih godina sve je više studija o smanjenju stresa kod riba. Osim razvoja novih tehnologija za poboljšanje okolišnih uvjeta akvakulture, bitno je uključiti korisne aditive u njihovu hranu za životinje kako bi se ublažio odgovor na stres na tipične čimbenike stresa. Upotreba različitih aditiva u ribljoj prehrani za ublažavanje odgovora na stres opsežno je proučavana. U tim studijama zabilježene su imunološke, nutritivne i metaboličke promjene, uvijek povezane s endokrinim procesima. Biokemijska priroda i fiziološka funkcionalnost ovih dodataka hrani za životinje značajno utječu na odgovor na stres, jer mogu djelovati kao neurotransmiteri ili prekursori hormona, energetski supstrati, kofaktori i drugi bitni elementi, što zauzvrat stvara odgovore više sustava i više organa (Herrera i sur., 2019).

Neki od dodataka hrani za smanjenje fiziološkog utjecaja stresa su lipidi i masne kiseline, vitamini, minerali, aminokiseline, nukleotidi, prebiotici i antioksidansi. Ding i suradnici (2022) ispitali su utjecaj sintetičkih PUFA na smanjenje utjecaja temperature na koralje. Otkrili su da su i razvoj ličinki i naseljavanje ličinki značajno poboljšani u skupini dodataka prehrani, dok su se stope superoksid dismutaze, katalaze i smrtnosti koralja pod stresom smanjile. Druga studija ispitala je potencijalne imunomodulatorne učinke *Astragalus membranaceus* (AM) i *Glycyrrhiza glabra* (sladić) na žutog smuđa (*Perca flavescens*), gdje su bile pogođene vrijednosti parametara stresa (Elabd i sur., 2016). Tijekom eksperimenta izvijestili su da davanje AM i sladića značajno poboljšava performanse rasta, antioksidacije i profile imunološkog odgovora – što je sve korisno kao prirodno ublažavanje stresa.



Slika 4.4. Učinci funkcionalnih dodataka hrani za životinje u akvakulturi (prilagođeno iz Onomu & Okuthe, 2024)

## Sažetak

Globalno zagrijavanje može povećati temperaturu vode, povećavajući brzinu metabolizma vrsta u akvakulturi, zahtijevajući promjene u formulaciji hrane kako bi se zadovoljile povećane potrebe za hranjivim tvarima. Potrebno je prilagoditi omjere proteina, lipida i ugljikohidrata u hrani za životinje kako bi se prilagodili promjenjivim metaboličkim potrebama i osigurali optimalan rast i zdravlje vrsta. Budući da su riblji stokovi koji se koriste za riblje brašno i riblje ulje pod utjecajem klimatskih promjena, alternativni izvori proteina kao što su brašno od kukaca, alge i biljni proteini postaju važni za održivu hranu za akvakulturu. Potrebne su inovacije u sastavu hrane za životinje kako bi se smanjio ekološki otisak, kao što je upotreba sastojaka iz otpada i optimizacija omjera pretvorbe hrane. Primjena naprednih tehnologija hranjenja, kao što su automatizirane hranilice i praćenje u stvarnom vremenu, važna je za optimizaciju distribucije hrane, smanjenje otpada i osiguravanje učinkovitog korištenja resursa. Učestalost i količine hranjenja treba modificirati kako bi odgovarale promjenjivom apetitu i stopama rasta vrsta u promjenjivim temperaturnim uvjetima. Puferirajuća sredstva treba dodati u formulacije hrane za životinje kako bi se ublažili učinci zakiseljavanja oceana na probavnu fiziologiju vrsta u akvakulturi. Korisno je razviti strategije hranjenja koje povećavaju otpornost vrsta akvakulture na kisele uvjete, kao što je uključivanje minerala i vitamina koji podržavaju otpornost na stres. Korištenje enzimskih aditiva za poboljšanje probavljivosti sastojaka hrane i poboljšanje apsorpcije hranjivih tvari od vitalnog je značaja, čime se maksimizira rast i zdravlje u promjenjivim uvjetima okoliša. Dodavanje korisnih mikroorganizama i prebiotičkih spojeva u hranu za podršku

zdravlju crijeva, jačanje imuniteta i povećanje ukupne učinkovitosti hrane u suočavanju sa stresorima povezanim s globalnim zatopljenjem povećat će učinkovitost.

## Literatura

- Aasen, I. M., Sandbakken, I. S., Toldnes, B., Roleda, M. Y., & Slizyte, R. (2022). Enrichment of the protein content of the macroalgae *Saccharina latissima* and *Palmaria palmata*. *Algal research*, 65, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102727>
- Abdel-Latif, H. M., Abdel-Tawwab, M., Khafaga, A. F., & Dawood, M. A. (2020). Dietary oregano essential oil improved the growth performance via enhancing the intestinal morphometry and hepato-renal functions of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture*, 526, 735432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735432>
- Ahmad, A., W. Hassan, S., & Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521–9547. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>
- Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental management*, 63, 159–172. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3>
- Akbari Nargesi, E., Falahatkar, B., & Sajjadi, M. M. (2020). Dietary supplementation of probiotics and influence on feed efficiency, growth parameters and reproductive performance in female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock. *Aquaculture Nutrition*, 26(1), 98–108. <https://doi.org/10.1111/anu.12970>
- Albrektsen, S., Kortet, R., Skov, P. V., Ytteborg, E., Gitlesen, S., Kleinegris, D., ... & Øverland, M. (2022). Future feed resources in sustainable salmonid production: A review. *Reviews in aquaculture*, 14(4), 1790–1812. <https://doi.org/10.1111/raq.12673>
- Alfiko, Y., Xie, D., Astuti, R. T., Wong, J., & Wang, L. (2022). Insects as a feed ingredient for fish culture: Status and trends. *Aquaculture and fisheries*, 7(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.10.004>
- Allegretti, G., Schmidt, V., & Talamini, E. (2017). Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production. *World's poultry science journal*, 73(4), 928–937. <https://doi.org/10.1017/S004393391700054X>
- Alloul, A., Wille, M., Lucenti, P., Bossier, P., Van Stappen, G., & Vlaeminck, S. E. (2021). Purple bacteria as added-value protein ingredient in shrimp feed: *Penaeus vannamei* growth performance, and tolerance against *Vibrio* and ammonia stress. *Aquaculture*, 530, 735788. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735788>
- Amin, M. N., Barnes, R. K., & Adams, L. R. (2014). Effect of temperature and varying level of carbohydrate and lipid on growth, feed efficiency and nutrient digestibility of brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill, 1814). *Animal feed science and technology*, 193, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.04.016>
- Amin, M. N., Carter, C. G., Katersky Barnes, R. S., & Adams, L. R. (2016). Protein and energy nutrition of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) at optimal and elevated temperatures. *Aquaculture nutrition*, 22(3), 527–540. <https://doi.org/10.1111/anu.12274>
- Ang, C. Y., Yong, A. S. K., Azad, S. A., Lim, L. S., Zuldin, W. H., & Lal, M. T. M. (2021). Valorization of macroalgae through fermentation for aquafeed production: A review. *Fermentation*, 7(4), 304. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040304>
- Ashour, M., Abo-Taleb, H. A., Hassan, A. K. M., Abdelzaher, O. F., Mabrouk, M. M., Elokaby, M. A., & Mansour, A. T. (2021). Valorization use of amphipod meal, *Gammarus pulex*, as a fishmeal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. *Journal of marine science and engineering*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/jmse9121336>
- Becker, E. W. (2013). Microalgae for aquaculture: nutritional aspects. *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*, 671–691. ISBN:9780470673898.



- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., & Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Blacher, E., Levy, M., Tatirovsky, E., & Elinav, E. (2017). Microbiome-modulated metabolites at the interface of host immunity. *The journal of immunology*, 198(2), 572–580. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1601247>
- Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Davis, R. P. (2022). The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. *Food security*, 14(3), 805–827. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01246-9>
- Bozkurt, M., Aysul, N., Küçükylmaz, K., Aypak, S., Ege, G., Catli, A. U., ... & Çınar, M. (2014). Efficacy of in-feed preparations of an anticoccidial, multienzyme, prebiotic, probiotic, and herbal essential oil mixture in healthy and *Eimeria* spp. – infected broilers. *Poultry science*, 93(2), 389–399. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03368>
- Bunting, M. (2021). *Making fish feed greener: by-products the key to a sustainable aquaculture industry*. 22 September 2021. <https://disruptr.deakin.edu.au/environment/making-fish-feed-greener-by-products-the-key-to-a-sustainable-aquaculture-industry/>
- Cheung, W. W. L., Maire, E., Oyinlola, M. A., Robinson, J. P. W., Graham, N. A. J., Lam, V. W. Y., McNeil, M. A., & Hicks, C. C. (2023). Climate change exacerbates nutrient disparities from seafood. *Nature Climate Change*, 13, 1242–1249. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01822-1>
- Cottrell, R. S., Blanchard, J. L., Halpern, B. S., Metian, M., & Froehlich, H. E. (2020). Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature food*, 1(5), 301–308. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>
- Cowieson, A. J., & Ravindran, V. (2008). Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy, minerals and amino acids. *British poultry science*, 49(1), 37–44. <https://doi.org/10.1080/0007166070181298>
- Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S. J., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>
- Delamare-Deboutteville, J., Batstone, D. J., Kawasaki, M., Stegman, S., Salini, M., Tabrett, S., & Hülsen, T. (2019). Mixed culture purple phototrophic bacteria is an effective fishmeal replacement in aquaculture. *Water research X*, 4, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100031>
- Demir, E., Sarica, Ş., Özcan, M. A., & Sui Mez, M. (2003). The use of natural feed additives as alternatives for an antibiotic growth promoter in broiler diets. *British poultry science*, 44(S1), 44–45. <https://doi.org/10.1080/713655288>
- Ding, D. S., Wang, S. H., Sun, W. T., Liu, H. L., & Pan, C. H. (2022). The effect of feeding on *briareum violacea* growth, survival and larval development under temperature and salinity stress. *Biology*, 11(3), 410. <https://doi.org/10.3390/biology11030410>
- Ebenezzar, S., Singh, D. K., Sahoo, S., Prabu Linga, D., & Pal, A. K. (2023). *Outlook of Climate Change and Fish Nutrition*. Editors: Archana Sinha, Shivendra Kumar, Kavita Kumari. Springer, ISBN 978-981-19-5499-3, (eBook).
- Eissa, E. S. H., Ahmed, R. A., Abd Elghany, N. A., Elfeky, A., Saadony, S., Ahmed, N. H., Sakr, S. E. S., Dayrit, G. B., Tolenada, C. P. S., Atienza, A. A. C., Mabrok, M., & Ayoub, H. F. (2023). Potential symbiotic effects of  $\beta$ -1,3 glucan, and fructooligosaccharides on the growth performance, immune response, redox status, and resistance of pacific white shrimp, *litopenaeus vannamei* to *Fusarium solani* infection. *Fishes*, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/fishes8020105>
- Elabd, H., Wang, H. P., Shaheen, A., Yao, H., & Abbass, A. (2016). Feeding *Glycyrrhiza glabra* (liquorice) and *Astragalus membranaceus* (AM) alters innate immune and physiological responses in yellow perch (*Perca flavescens*). *Fish & shellfish immunology*, 54, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.04.024>
- El-Kady, A. A., Magouz, F. I., Mahmoud, S. A., & Abdel-Rahim, M. M. (2022). The effects of some commercial probiotics as water additive on water quality, fish performance, blood biochemical parameters, expression of growth and immune-related genes, and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 546, 737249. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737249>

FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*. FAO: Rome, Italy. ISBN 978-92-5-132692-3.

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237–240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>

Fowles, T. M., & Nansen, C. (2020). Insect-based bioconversion: value from food waste. *Food waste management: solving the wicked problem*, 321–346. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20561-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20561-4_12)

Froehlich, H. E., Jacobsen, N. S., Essington, T. E., Clavelle, T., & Halpern, B. S. (2018). Avoiding the ecological limits of forage fish for fed aquaculture. *Nature sustainability*, 1(6), 298–303. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0077-1>

Fuller, R. (1989). Probiotics in man and animals. *The Journal of applied bacteriology*, 66(5), 365–378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1989.tb05105.x>

Garcia-Launay, F., Dusart, L., Espagnol, S., Laisse-Redoux, S., Gaudre, D., Meda, B., & Wilfart, A., (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British journal nutrition*, 120, 1298–1309. <https://doi.org/10.1017/s0007114518002672>

Gardiner, G. E., Metzler-Zebeli, B. U., & Lawlor, P. G. (2020). Impact of intestinal microbiota on growth and feed efficiency in pigs: A review. *Microorganisms*, 8(12), 1886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121886>

Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P. P., De Angelis, A., ... & Roncarati, A. (2020). Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Italian journal of animal science*, 19(1), 360–372. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1743209>

Geda, F., Rekecki, A., Decostere, A., Bossier, P., Wuyts, B., Kalmar, I. D., & Janssens, G. P. J. (2012). Changes in intestinal morphology and amino acid catabolism in common carp at mildly elevated temperature as affected by dietary mannanoligosaccharides. *Animal feed science and technology*, 178(1–2), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.09.008>

Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Javahery, S., & Van Doan, H. (2022). Effects of dietary vitamin C, thyme essential oil, and quercetin on the immunological and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture*, 553, 738053. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738053>

Giannenas, I., Triantafyllou, E., Stavrakakis, S., Margaroni, M., Mavridis, S., Steiner, T., & Karagouni, E. (2012). Assessment of dietary supplementation with carvacrol or thymol containing feed additives on performance, intestinal microbiota and antioxidant status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 350, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.027>

Glencross, B. D., Huyben, D., & Schrama, J. W. (2020). The application of single-cell ingredients in aquaculture feeds-a review. *Fishes*, 5(3), 22. <https://doi.org/10.3390/fishes5030022>

Godoy M. G., Amorim G. M., Barreto M. S., & Freire D. M. G. (2018). Chapter 12 – Agricultural Residues as Animal Feed: Protein Enrichment and Detoxification Using Solid-State Fermentation. In A. Pandey, C. Larroche, C. R. Soccol (eds.), *In Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 235–256). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00012-8>

Groot, R., Lyons, P., & Schrama, J. W. (2021). Digestible energy versus net energy approaches in feed evaluation for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 274, 114893. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114893>

Guerreiro, I., Castro, C., Antunes, B., Coutinho, F., Rangel, F., Couto, A., ... & Enes, P. (2020). Catching black soldier fly for meagre: Growth, whole-body fatty acid profile and metabolic responses. *Aquaculture*, 516, 734613. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734613>

Guillen, A. C., Borges, M. E., Herrerias, T., Kandalski, P. K., de Arruda Marins, E., Viana, D., ... & Donatti, L. (2019). Effect of gradual temperature increase on the carbohydrate energy metabolism responses of the antarctic fish *notothenia rossii*. *Marine environmental research*, 150, 104779. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104779>



- Hanachi, P., Karbalaeei, S., Walker, T. R., Cole, M., & Hosseini, S. V. (2019). Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (*Cyprinus carpio*). *Environmental science and pollution research*, 26, 23777–23787. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05637-6>
- Herrera, M., Mancera, J. M., & Costas, B. (2019). The use of dietary additives in fish stress mitigation: comparative endocrine and physiological responses. *Frontiers in endocrinology*, 10, 447. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00447>
- Hilborn, R., Banobi, J., Hall, S. J., Pucylowski, T., & Walsworth, T. E. (2018). The environmental cost of animal source foods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(6), 329–335. <https://doi.org/10.1002/fee.1822>
- Howell, M. (2022). *An insider's view of advances in aquaculture nutrition*. 23 September 2022. <https://thefishsite.com/articles/an-insiders-view-of-advances-in-aquaculture-nutrition-alltech-coppens>
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., ... & Strugnell, J. M. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One earth*, 1(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>
- Huertas, I. E., Rouco, M., Lopez-Rodas, V., & Costas, E. (2011). Warming will affect phytoplankton differently: evidence through a mechanistic approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1724), 3534–3543. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0160>
- Huguet, C. T., Norambuena, F., Emery, J. A., Hermon, K., & Turchini, G. M. (2015). Dietary n-6/n-3 LC-PUFA ratio, temperature and time interactions on nutrients and fatty acids digestibility in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 436, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.11.011>
- Idenyi, J. N., Eya, J. C., Nwankwegu, A. S., & Nwoba, E. G. (2022). Aquaculture sustainability through alternative dietary ingredients: Microalgal value-added products. *Engineering microbiology*, 2(4), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100049>
- Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current opinion in biotechnology*, 61, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>
- Jusadi, D., Ekasari, J., Suprayudi, M. A., Setiawati, M., & Fauzi, I. A. (2021). Potential of underutilized marine organisms for aquaculture feeds. *Frontiers in marine science*, 7, 609471. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.609471>
- Khan, M. A., Das, S. K., & Bhakta, D. (2018). Food and feeding habits, gastro-somatic index and gonado-somatic index of *Scylla serrata* from Hooghly-Matlah estuary of West Bengal, India. *Journal of the marine biological association of india*, 60(1), 14. <https://doi.org/10.6024/jmbai.2018.60.1.1994-02>
- Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. *PLoS One*, 13(1), e0190730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190730>
- Legrand, T. P., Wynne, J. W., Weyrich, L. S., & Oxley, A. P. (2020). A microbial sea of possibilities: current knowledge and prospects for an improved understanding of the fish microbiome. *Reviews in aquaculture*, 12(2), 1101–1134. <https://doi.org/10.1111/raq.12375>
- Li, Y., Kortner, T. M., Chikwati, E. M., Belghit, I., Lock, E. J., & Kroghdahl, Å. (2020). Total replacement of fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal does not compromise the gut health of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 520, 734967. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734967>
- Lock, E. J., Biancarosa, I., & Gasco, L. (2018). Insects as raw materials in compound feed for aquaculture. *Edible insects in sustainable food systems*, 263–276. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_16)
- Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: prospects and challenges. *Reviews in aquaculture*, 16(2), 818–835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
- Mackenzie, S. G., Leinonen, I., Ferguson, N., & Kyriazakis, I. (2016). Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *British journal of nutrition*, 115(10), 1860–1874. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000763>

- MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific reports*, 10(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>
- Mancuso, T., Pippinato, L., & Gasco, L. (2019). The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. *Calitatea*, 20(S2), 374–381. <https://www.researchgate.net/publication/332504133>
- Matassa, S., Papirio, S., Pikaar, I., Hülsen, T., Leijenhof, E., Esposito, G., ... & Verstraete, W. (2020). Upcycling of biowaste carbon and nutrients in line with consumer confidence: the “full gas” route to single cell protein. *Green chemistry*, 22(15), 4912–4929. <https://doi.org/10.1039/D0GC01382J>
- Messeder, T. (2021). *Innovation opportunities in European Aquaculture*. KTN AgriFood and EIT Food. March 2021.
- Mo, W. Y., Cheng, Z., Choi, W. M., Man, Y. B., Liu, Y., & Wong, M. H. (2014). Application of food waste-based diets in polyculture of low trophic level fish: Effects on fish growth, water quality and plankton density. *Marine pollution bulletin*, 85(2), 803–809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.020>
- Nadermann, N., Seward, R. K., & Volkoff, H. (2019). Effects of potential climate change-induced environmental modifications on food intake and the expression of appetite regulators in goldfish. *Comparative biochemistry and physiology part a: molecular & integrative physiology*, 235, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.06.001>
- Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., ... & Kumar, G. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of biotechnology*, 341, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Nasser, N., Abiad, M. G., Babikian, J., Monzer, S., & Saoud, I. P. (2018). Using restaurant food waste as feed for Nile tilapia production. *Aquaculture research*, 49(9), 3142–3150. <https://doi.org/10.1111/are.13777>
- Nathanailides, C., Kolygas, M., Choremi, K., Mavraganis, T., Gouva, E., Vidalis, K., & Athanassopoulou, F. (2021). Probiotics Have the Potential to Significantly Mitigate the Environmental Impact of Freshwater Fish Farms. *Fishes*, 6(4), 76. <https://doi.org/10.3390/fishes6040076>
- Nielsen, T. B., Würtz, A. M. L., Tjønneland, A., Overvad, K., & Dahm, C. C. (2022). Substitution of unprocessed and processed red meat with poultry or fish and total and cause-specific mortality. *British Journal of Nutrition*, 127(4), 563–569. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001252>
- NOAA Fisheries. (2022). *Climate Resilience and Aquaculture. Fact Sheet 2022*. [www.fisheries.noaa.gov/aquaculture](http://www.fisheries.noaa.gov/aquaculture)
- Ojeda, J. (2021). *Can sustainable aquaculture help to achieve the UN SDGs?* 17 August, 2021. <https://www.eitfood.eu/blog/can-sustainable-aquaculture-help-to-achieve-the-un-sdgs>
- Onomu, A. J., & Okuthe, G. E. (2024). The Role of Functional Feed Additives in Enhancing Aquaculture Sustainability. *Fishes*, 9(5), 167. <https://doi.org/10.3390/fishes9050167>
- Oscar, E. V., Joshua, E. O., Felix, E., & Eyerituvie, A. F. (2020). A Review on the Application and Benefits of Probiotics Supplements in Fish Culture. *Oceanography & Fisheries Open Access Journal*, 11(4), 62–65. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2020.11.555817>
- Parker, L. M., Scanes, E., O'Connor, W. A., Dove, M., Elizur, A., Pörtner, H. O., & Ross, P. M. (2024). Resilience against the impacts of climate change in an ecologically and economically significant native oyster. *Marine pollution bulletin*, 198, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115788>
- Pombo, A., Baptista, T., Granada, L., Ferreira, S. M., Gonçalves, S. C., Anjos, C., ... & Costa, J. L. (2020). Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. *Reviews in aquaculture*, 12(1), 107–121. <https://doi.org/10.1111/raq.12307>
- Porteus, C. S., Hubbard, P. C., Uren Webster, T. M., van Aerle, R., Canário, A. V., Santos, E. M., & Wilson, R. W. (2018). Near-future CO<sub>2</sub> levels impair the olfactory system of a marine fish. *Nature climate change*, 8(8), 737–743. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0224-8>

- Puvanasundram, P., Chong, C. M., Sabri, S., Yusoff, M. S., & Karim, M. (2021). Multi-strain probiotics: Functions, effectiveness and formulations for aquaculture applications. *Aquaculture reports*, 21, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100905>
- Qiu, X., Neori, A., Kim, J. K., Yarish, C., Shpigel, M., Guttman, L., ... & Davis, D. A. (2018). Evaluation of green seaweed *Ulva* sp. as a replacement of fish meal in plant-based practical diets for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Journal of applied phycology*, 30, 1305–1316. <https://www.researchgate.net/publication/320042463>
- Ragaza, J. A., Hossain, M. S., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Kotzamanis, Y., ... & Kumar, V. (2021). Brown seaweed (*Sargassum fulvellum*) inclusion in diets with fishmeal partially replaced with soy protein concentrate for Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) juveniles. *Aquaculture nutrition*, 27(4), 1052–1064. <https://doi.org/10.1111/anu.13246>
- Rasidi, R., Jusadi, D., Setiawati, M., Yuhana, M., Zairin Jr, M., & Sugama, K. (2021). Dietary Supplementation of humic acid in the Feed of juvenile asian seabass, *Lates calcarifer* to counteract possible negative effects of Cadmium Accumulation on Growth and Fish Well-being when Green Mussel (*Perna viridis*) is used as a Feed ingredient. *Aquaculture research*, 52(6), 2550–2568. <https://doi.org/10.1111/are.15104>
- Reid, G. K., Gurney-Smith, H., Marcogliese, D. J., Knowler, D., Benfey, T., Garber, A. F., Forster, I., Chopin, T., Brewer-Dalton, K., Moccia, R. D., Flaherty, M. S., Smith, C. T., de Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: considering biological response and resources. *Aquaculture environment interactions*, 11, 569–602. <https://doi.org/10.3354/aei00332>
- Rimoldi, S., Torrecillas, S., Montero, D., Gini, E., Makol, A., Valdenegro, V. V. et al. (2020). Assessment of dietary supplementation with galactomannan oligosaccharides and phytogenics on gut microbiota of European sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) fed low fishmeal and fish oil based diet. *PLoS ONE* 15(4), e0231494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231494>
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein – state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
- Sandblom, E., Gräns, A., Axelsson, M., & Seth, H. (2014). Temperature acclimation rate of aerobic scope and feeding metabolism in fishes: implications in a thermally extreme future. *Proceedings of the royal society b: biological sciences*, 281(1794), 20141490. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1490>
- Sarker, P. K. (2023). Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. *Microorganisms*, 11(2), 439. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020439>
- Sarker, P. K., Fournier, J., Boucher, E., Proulx, E., de la Noüe, J., & Vandenberg, G. W. (2011). Effects of low phosphorus ingredient combinations on weight gain, apparent digestibility coefficients, non-fecal phosphorus excretion, phosphorus retention and loading of large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 168, 241–9. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.086>
- Sarker, P. K., Kapuscinski, A. R., McKuin, B., Fitzgerald, D. S., Nash, H. M., & Greenwood, C. (2020). Microalgae-blend tilapia feed eliminates fishmeal and fish oil, improves growth, and is cost viable. *Scientific reports*, 10(1), 19328. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75289-x>
- Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Kocova Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. (2021). A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>
- Sepulveda, J., & Moeller, A. H. (2020). The effects of temperature on animal gut microbiomes. *Frontiers in microbiology*, 11, 384. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00384>
- Shahin, S., Okomoda, V. T., Ma, H., & Ikhwannuddin, M. (2023). Sustainable alternative feed for aquaculture: state of the art and future perspective. *Planetary sustainability*, 1(1), 62–96. <https://www.researchgate.net/publication/373874626>
- Sharma, J., Singh, S. P., & Chakrabarti, R. (2017). Effect of temperature on digestive physiology, immune-modulatory parameters, and expression level of Hsp and LDH genes in *Catla catla* (Hamilton, 1822). *Aquaculture*, 479, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.05.031>

Siikavuopio, S.I., James, P., Lysne, H., & Saather, B. J. (2012). Effects of size and temperature on growth and feed conversion of juvenile green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*). *Aquaculture*, 354–355, 27–30. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.036>

Smárason, B. Ö. (2023). *Why are sustainable feed need? Eit Food*. 01.07.2023. <https://www.eitfood.eu/blog/fish-feed-why-we-need-sustainable-alternatives>

Stumpp, M., Hu, M., Casties, I., Saborowski, R., Bleich, M., Melzner, F., & Dupont, S. (2013). Digestion in sea urchin larvae impaired under ocean acidification. *Nature climate change*, 3(12), 1044–1049. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2028>

Tait, J. (2021). *New approach to feed production can transform climate impact of industries including fish farming*. <https://www.sps.ed.ac.uk/news-events/news/new-approach-feed-production-can-transform-climate-impact-industries-including>

Tocher, D. R., Betancor, M. B., Sprague, M., Olsen, R. E., & Napier, J. A. (2019). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: Bridging the gap between supply and demand. *Nutrients*, 11(1), 89. <https://doi.org/10.3390/nu11010089>

Trinh, L. T., Bakke, I., & Vadstein, O. (2017). Correlations of age and growth rate with microbiota composition in Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae. *Scientific reports*, 7(1), 8611. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09073-9>

Van Doan, H., Hoseinifar, S. H., Tapingkae, W., Seel-Audom, M., Jaturasitha, S., Dawood, M. A., & Esteban, M. Á. (2020). Boosted growth performance, mucosal and serum immunity, and disease resistance Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings using corn-cob-derived xylooligosaccharide and *Lactobacillus plantarum* CR1T5. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 12, 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100953>

Vieira, L., Filipe, D., Amaral, D., Magalhães, R., Martins, N., Ferreira, M., ... & Peres, H. (2023). Solid-state fermentation as green technology to improve the use of plant feedstuffs as ingredients in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Animals*, 13(17), 2692. <https://doi.org/10.3390/ani13172692>

Volkoff, H. (2019). Feeding and its regulation. In *Climate change and non-infectious fish disorders* (pp. 87–101). Wallingford UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786393982.0087>

Warwas, N. (2023). *Novel Marine Ingredients for Aquaculture - Fish Nutrition, Physiology and Intestinal Health*. Doctoral thesis, University of Gothenburg Faculty of Science, Department of Biological and Environmental Sciences. Institutionen för biologi och miljövetenskap. ISBN 978-91-8069-513-8 978-91-8069-514-5

Widanarni, W., Taufik, A., Yuhana, M., & Ekasari, J. (2019). Dietary mannan ligosaccharides positively affect the growth, digestive enzyme activity, immunity and resistance against vibrio harveyi of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae. *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 19, 271–278. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19\\_4\\_01](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_4_01)

Wilfart, A., Garcia-Launay, F., Terrier, F., Soudé, E., Aguirre, P., & Skiba-Cassy, S. (2023). A step towards sustainable aquaculture: Multiobjective feed formulation reduces environmental impacts at feed and farm levels for rainbow trout. *Aquaculture*, 562, 738826.

Yadav, S., & Jha, R. (2019). Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0310-9>

Yousefi, M., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Rashidian, G., & Van Doan, H. (2021). Effects of dietary marjoram, *Origanum majorana* extract on growth performance, hematological, antioxidant, humoral and mucosal immune responses, and resistance of common carp, *Cyprinus carpio* against *Aeromonas hydrophila*. *Fish & shellfish immunology*, 108, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.11.019>

Zengin, M., Sur, A., İlhan, Z., Azman, M. A., Tavşanlı, H., Esen, S., Bacaksız, O. K., Demir, E. (2022). Effects of fermented distillers grains with solubles, partially replaced with soybean meal, on performance, blood parameters, meat quality, intestinal flora, and immune response in broiler. *Research in veterinary science*, 150, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.06.027>



Funded by  
the European Union



## The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Zhang, Z., Liu, H., Jin, J., Zhu, X., Han, D., & Xie, S. (2024). Towards a low-carbon footprint: Current status and prospects for aquaculture. *Water biology and security*, 3, 1–15, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100290>

Ziv-Douki, H. (2020). Combining strengths for greater impact. *Cargill aqua nutrition sustainability report 2020. Healthy seafood for future generations*. <https://www.cargill.com/doc/1432196768685/cargill-aqua-nutrition-sustainability-report-2020.pdf>

# Poglavlje 5. Učinci globalnog zatopljenja na bolesti u akvakulturi i zaštitnim primjenama

izv. prof. dr. sc. Gražina Žibienė  
Alvydas Žibas, voditeljica Centra za akvakulturu  
Sveučilište Vytautas Magnus

## Uvod

Klimatske promjene su u tijeku i utječu na vodeni okoliš (slatkovodni, morski ili bočati ekosustavi) povećanjem temperature vode, promjenama razine vode i režima protoka, eutrofikacijom, zakiseljavanjem, promjenom opterećenja hranjivim tvarima, povećanjem prodora ultraljubičastog (UV) svjetla, smanjenjem staništa i degradacije te povećanjem toplinskog stresa i rasprostranjenosti vrsta.

Varijacije u vodenom okolišu, kao što su temperatura, salinitet i kronični stress, niske razine otopljenog kisika, utječu na mukozne barijere, epitele, imunološke stanice i unutarnji okoliš (tj. tjelesne tekućine, stanice, tkiva i organe) na/u vodenim organizmima. To dovodi do smanjene imunokompetencije u vodenim organizmima, slabog rasta i nižih reproduktivnih performansi.

Klimatske promjene, koje uključuju globalno zatopljenje, također mogu negativno utjecati na rezerve energije u ribama, pridonoseći povećanom oksidativnom stresu i smanjenoj toplinskoj toleranciji (Woo i Iwama, 2019).

Procjenjuje se da čovječanstvo treba proizvesti više od 80 milijuna tona (t) do 2030. kako bi održalo potrošnju morskih proizvoda na sadašnjim razinama, kako bi održalo trenutnu potrošnju po glavi stanovnika. Stoga će akvakultura morati proizvesti dodatnih 30 milijuna tona morskih proizvoda u manje od desetljeća i pol. Vjerojatno nema dovoljno kopna ili prikladnih morskih područja da se to dogodi bez velikih poremećaja u višestrukim ekosustavima. Međutim, oko 40% ukupne proizvodnje akvakulture gubi se zbog bolesti, kao što je široko definirano u nastavku. Dakle, jednostavnim uklanjanjem **ili ograničavanjem utjecaja bolesti, čovječanstvo bi moglo gotovo zadovoljiti zahtjeve za morskim proizvodima bez promjene bilo kakvih praksi korištenja zemljišta** (Lucas i sur., 2019).

Predviđa se da će se prosječna globalna temperatura zraka povećati za 0,5–1,5 °C do 2030., a očekuje se da će se učinci ubrzati i nakon porasta globalne temperature od 1–2 °C. Predviđa se da će globalna temperatura oceana u gornjih 100 m porasti za 0,6–2,0 °C do 2100. godine. Toplinsko širenje zagrijavanja oceanske vode i otapanje ledenih ploča i ledenjaka vrlo će vjerojatno uzrokovati porast globalne srednje razine mora od 10–35 cm do 2050. godine. Klimatske promjene također su dovele do povećane učestalosti ekstremnih vremenskih prilika, kao što su oluje i suše. Do 2050. troškovi

ekstremnih vremenskih uvjeta mogli bi doseći 1% globalnog BDP-a godišnje. Oko 20-35% emisija CO<sub>2</sub> preuzimaju oceani, što dovodi do zakiseljavanja oceana.

Globalno zatopljenje povećava prevalenciju i intenzitet bolesti. Povišene temperature vode mogu poboljšati stope rasta i razmnožavanja patogena, što dovodi do češćih i težih izbijanja bolesti u akvakulturi. Više temperature vode ubrzavaju životne cikluse mnogih vodenih patogena, povećavajući njihovu prevalenciju i virulenciju. Bakterije, virusi i paraziti mogu postati agresivniji ili razviti otpornost na tretmane. Mnoge vrste akvakulture imaju uske raspone toplinske tolerancije. Povišene temperature mogu oslabiti njihov imunološki sustav, čineći ih osjetljivijima na infekcije i bolesti. Toplije vode mogu omogućiti tropskim i subtropskim patogenima da prošire svoj raspon, izlažući vrste akvakulture u umjerenim regijama novim bolestima.

Klimatske promjene prijete jedinstvenim i ranjivim ekosustavima poput koraljnih grebena. U kopnenim i slatkovodnim ekosustavima klimatske promjene uzrokuju gubitak biološke raznolikosti i povećanu kolonizaciju invazivnim vrstama. Kombinirani učinci porasta razine mora, obalne erozije, onečišćenja i zakiseljavanja oceana prijete obalnim ekosustavima (Lucas i sur., 2019).

Implikacije klimatskih promjena na akvakulturu u budućnosti su duboke. Budući da klimatske promjene rezultiraju povećanom učestalošću suša i ekstremnih vremenskih uvjeta, mogu se očekivati poremećaji u proizvodnji u ribnjacima. Nadalje, smanjeni prinosi usjeva i povećana potražnja povezana s rastom stanovništva i gospodarskim rastom dovest će do nestašice i povećanja cijene robnih usjeva koji se koriste za proizvodnju hrane za akvakulturu. Porast razine mora i ekstremni vremenski uvjeti povećat će ranjivost akvakulture u obalnom području, uključujući obalne ribnjake s kozicama i ribom, splavi sa školjkama i kaveze za ribe, posebno u Aziji s obilnom infrastrukturom za akvakulturu.

Zakiseljavanje oceana dovest će u pitanje održivost akvakulture školjkaša na obali. Globalne klimatske promjene vjerojatno će pogoršati osjetljivost akvakulture na bolesti (Lucas i sur., 2019).

Povećane razine CO<sub>2</sub> dovode do zakiseljavanja oceana, što utječe na kalcificirajuće organizme poput školjkaša i koralja. Kiseli uvjeti slabe njihove ljuske i kosture, čineći ih ranjivijima na bolesti i stres iz okoliša. Zakiseljavanje može promijeniti sastav i zdravlje vodenih ekosustava, potencijalno utječući na vrste koje se oslanjaju na ta staništa, uključujući ona koja se uzgajaju u sustavima akvakulture.

Globalno zatopljenje može uzrokovati promjene u salinitetu kroz promijenjene obrasce oborina i povećano otjecanje slatke vode. Vrste akvakulture mogu doživjeti osmotski stres, što dovodi do veće osjetljivosti na bolesti i smanjenog rasta. Varijacije u salinitetu mogu utjecati na prevalenciju specifičnih patogena i bolesti, što zahtijeva prilagodbe u praksama upravljanja.

Zbog globalnog zatopljenja, povećano otjecanje hranjivih tvari iz poljoprivrede i urbanih područja može dovesti do eutrofikacije, uzrokujući cvjetanje algi i hipoksične uvjete. Ove promjene pogoršavaju kvalitetu vode i stvaraju okruženja pogodna za izbijanje bolesti.

Globalno zagrijavanje može uzrokovati štetno cvjetanje algi (HAB). Neki cvjetanje algi proizvodi toksine koji mogu izravno naštetiti vrstama akvakulture ili stvoriti uvjete koji pogoduju patogenim organizmima.

Ekstremni vremenski uvjeti, kao što su oluje i poplave, mogu uzrokovati fizičku štetu infrastrukturi akvakulture i dovesti do naglih promjena u kvaliteti vode. Ovi stresori mogu oslabiti zdravlje vodenih vrsta i povećati njihovu ranjivost na bolesti.

Globalno zagrijavanje može promijeniti distribuciju i raznolikost vodenih patogena. Novi ili prethodno rijetki patogeni mogu postati češći, što predstavlja nove izazove za upravljanje bolestima u akvakulturi.

Ostali učinci klimatskih promjena, kao što su hipoksija, zakiseljavanje i promjene saliniteta, mogu povećati stres i dodatno narušiti imunološku funkciju.

Globalno zatopljenje može promijeniti životne cikluse i interakcije između domaćina i parazita, što može dovesti do pojave novih vektora bolesti i putova prijenosa. Kako bi se prilagodili promjenjivom krajoliku patogena, operacije akvakulture moraju implementirati ažurirane strategije praćenja i upravljanja bolestima.

## 1. Uobičajene bolesti i njihovi učinci

### 1.1. Klasifikacija i ključni simptomi

#### *Uvod u bolesti akvakulture*

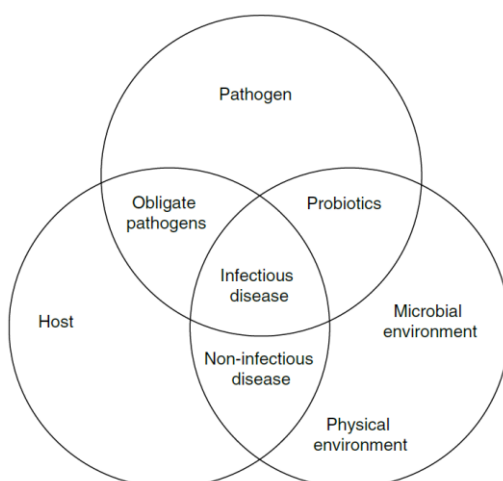
**Bolest** je reakcija tijela na nepovoljne čimbenike vanjskog okruženja. Kao rezultat toga, normalno funkcioniranje tijela je poremećeno, a njegova sposobnost prilagodbe je smanjena. Istodobno se mobiliziraju obrambene funkcije tijela.

Bolesti karakteriziraju određene kliničke pojave, simptomi, odgovarajuća oštećenja tjelesne strukture tkiva i poremećaji njihovih funkcija.

Sneizkova tri prstena, Vennov dijagram interakcija između domaćina (vrsta akvakulture), patogena i okoliša (slika 5.1), ilustrira činjenicu da je većina zaraznih bolesti trosmjerna interakcija koja zahtijeva sve komponente:

- Patogen;
- domaćin;
- okoliš.

Neinfektivna bolest je interakcija samo između domaćina i okoline. Područje preklapanja između patogena i domaćina predstavlja obvezne patogene: najopasniju skupinu, jer im nije potreban stres iz okoline da bi izazvali kliničku bolest (Lucas i sur., 2019).





*Slika 5.1. Modificirani Sneizkov model s tri prstena koji prikazuje interakciju između domaćina, patogena i okoliša (Lucas i sur., 2019).*

### **Abnormalnosti u ponašanju i tjelesne abnormalnosti**

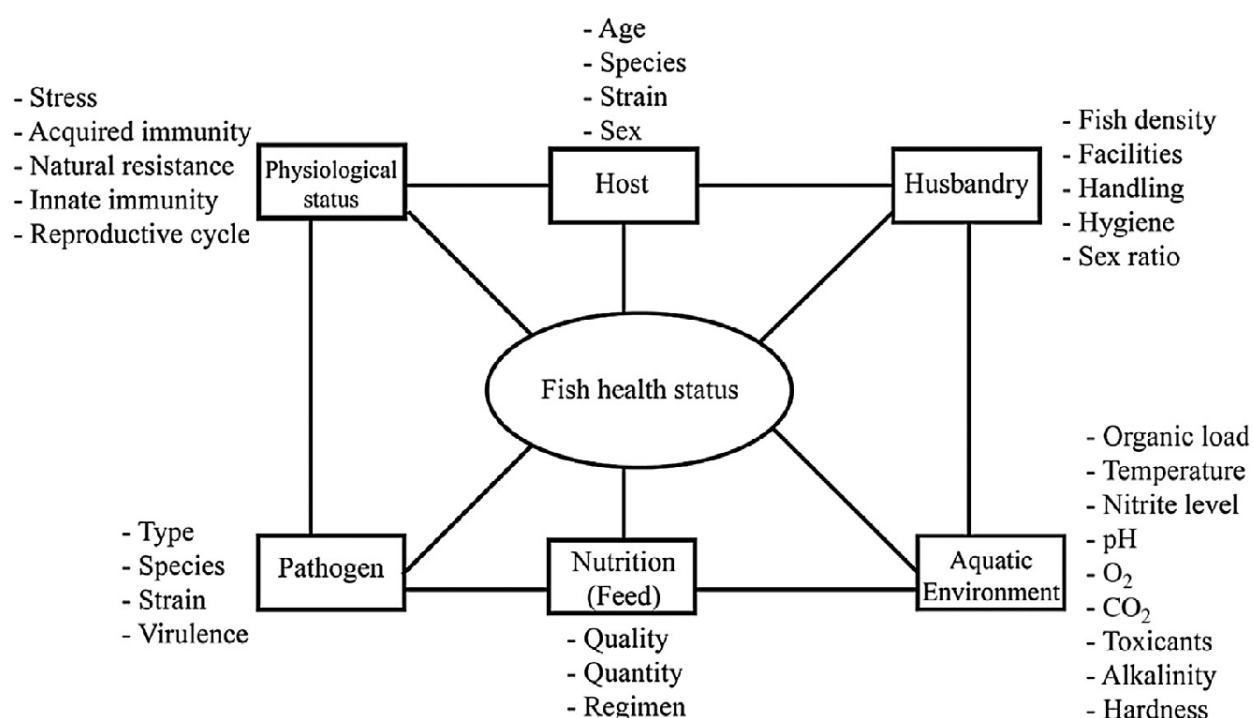
Nenormalno ponašanje često je prvi pokazatelj nadolazećeg zdravstvenog problema riba. Profesionalci moraju biti upoznati s očekivanim ponašanjem i izgledom ribljih vrsta. Sva ponašanja, uključujući hranjenje i plivanje, te reakcije na nagle pokrete, moraju se pažljivo promatrati. Proizvođač ribe mora naučiti razlikovati nijanse u ponašanju. Zdrave ribe pokazuju 'normalno' ponašanje. Tablica 5.1 navodi abnormalnosti koje se mogu primijetiti kada su ribe bolesne. Ovi znakovi pomoći će u dijagnosticiranju uzroka problema (Timmons i Ebeling, 2013).

*Tablica 5.1. Bihevioralni i fizički znakovi stresa i bolesti riba (Timmons i Ebeling, 2013)*

| Kretanje       | Slabo, nepredvidljivo ili letargično plivanje<br>Povećana ili smanjena reakcija na vanjske podražaje kao što su buka ili kretanje<br>Grebiranje, bljeskanje ili trljanje o spremnik<br>zidove ili dno<br>Trzanje, okretanje ili skakanje iz vode<br>Gužva u blizini dovoda vode<br>Plivanje naopako<br>Dahtanje na površini vode                                                                                                                                                                     |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hranidba       | Ne hrani se<br>Smanjeno hranjenje<br>(detektirano krivuljama rasta kao i promatranjem)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Disanje        | Smanjena brzina operkularnog pokreta<br>Povećana brzina operkularnog kretanja                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Fizičko stanje | Vidljive lezije ili ranice<br>Zamućene oči<br>Izbočene oči<br>Škrge natečene, bijele, ružičaste ili blijedocrvene, erodirane, natečena, krvava, smeđa<br>Gubitak ljusaka<br>Otečeni trbuh<br>Višak sluzi na koži i/ili škragama<br>(također, provjerite ima li viška sluzi na zaslonima spremnika)<br>Mrlje ili gljivice na koži<br>Neobične boje na površini tijela, uključujući crvenu<br>otečena područja, sive ili žute lezije<br>Raširen operkulum (škržni poklopci)<br>Pohabane peraje ili rep |

## Mjehurići u očima ili na koži

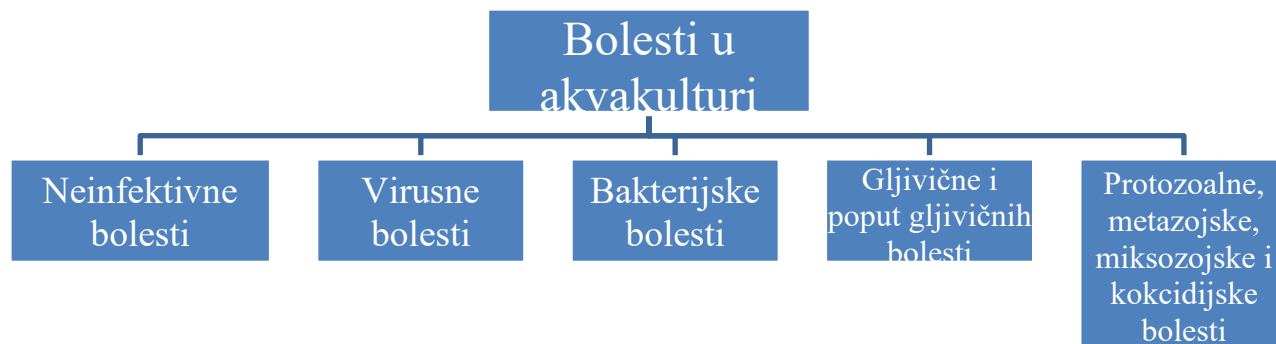
Ribe uzgojene u sustavima akvakulture suočavaju se s različitim vrstama stresora koji se općenito mogu klasificirati u abiotičke i biotičke stresore. Učinke abiotičkih stresora u uzgojenim ribama teško je procijeniti (Slika 5.2.). Neki od biotičkih čimbenika mogu se lako kontrolirati, a pažljiva manipulacija određenim biotičkim čimbenicima može uspješno spriječiti ili barem smanjiti gubitak bolesti u akvakulturi (Jeney, 2017).



Slika 5.2. Čimbenici koji utječu na zdravstveno stanje riba (Jeney, 2017)

### Klasifikacija bolesti u akvakulturi

Bolesti u akvakulturi mogu se kategorizirati u nekoliko skupina: neinfektivne bolesti, virusne bolesti, bakterijske bolesti, bolesti uzrokovane gljivicama i organizmima poput gljivica te bolesti uzrokovane parazitima (uključujući protozoe, metazoe i miksozoe, kao i kokcidije itd.) (Slika 5.3).



*Slika 5.3. Klasifikacija bolesti u akvakulturi*

Detaljne informacije o bolestima, etiologiji, signalizaciji, čimbenicima rizika, upravljanju i prevenciji mogu se pronaći u specijaliziranim izvorima, knjigama i bazama podataka, na primjer:

- Clinical Guide to Fish Medicine. (2021). Wiley eBooks.
- Noga, E. J. (2010). Fish Disease: Diagnosis and Treatment. John Wiley & Sons.
- American Fisheries Society–Fish Health Section. (2014). Blue Book: Suggested Procedures for the Detection and Identification of Certain Finfish and Shellfish Pathogens (2014 ed.). Retrieved from <http://afs-fhs.org/bluebook/bluebook-index.php>
- The Fish Site. (n.d.). Disease Information. Retrieved from <http://www.thefishsite.com/diseaseinfo/>
- Minnesota Department of Natural Resources. (n.d.). Fish Diseases. Retrieved from [https://www.dnr.state.mn.us/fish\\_diseases/index.html](https://www.dnr.state.mn.us/fish_diseases/index.html)

Primjeri uobičajenih vanjskih ili unutarnjih lezija koje ukazuju na stanja bolesti kod uzgojenih riba prikazani su u tablicama 5.2 i 5.3.

**Neinfektivne bolesti**

Neinfektivne bolesti povezane su s kvalitetom vode (niska razina otopljenog kisika, prezasićenost plinovima, barotrauma, temperaturni stres, pH stres i toksičnost od amonijaka, nitrita, nitrata, klora, teških metala, sumporovodika, pesticida itd.) ili drugim uzrocima (trauma, miopatija pri naporu, depigmentacija bočne linije, hiperplazija štitnjače, mukometra i ciste jajnika, zadržavanje ili vezanje jajnih stanica, distocija, katarakta, lipidna keratopatija, nedostatak mikronutrijenata, gastrointestinalna strana tijela, i neoplazija (Clinical Guide to Fish Medicine, 2021).

**1.2. Zarazne bolesti prema vrsti patogena****Virusne bolesti**

Većina poznatih virusnih patogena riba je iz tri porodice:

- Herpesviridae, Rhabdoviridae i Iridoviridae.

Sljedeće virusne bolesti riba najopasnije su i o njima se izvješćuje OIE (Svjetska organizacija za zdravlje životinja), regionalne i nacionalne organizacije odgovorne za bolesti životinja (Clinical Guide to Fish Medicine, 2021.):

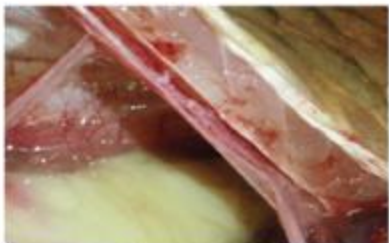
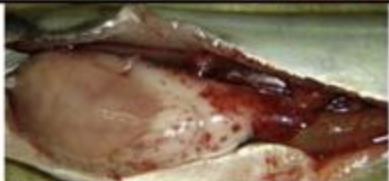
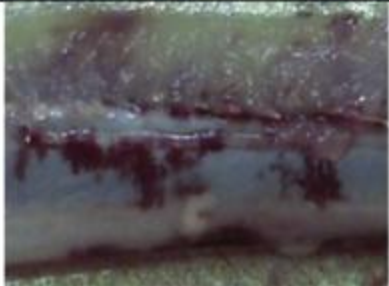
- Koi herpesvirus.
- Virusna hemoragijska septikemija.
- Infektivna hematopoetska nekroza.
- Proljetna viremija šarana.
- Epizootska hematopoetska nekroza.
- Iridovirus pagra.
- Infektivna anemija lososa.
- Salmonidni alfavirus.



Tablica 5.2. Primjeri uobičajenih vanjskih lezija koje ukazuju na stanja bolesti kod uzgojenih riba (Jeney, 2017)

| Abnormal Signs                                                                      | Possible Disease Causes                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Multifocal to coalescing hemorrhage suggestive of a systemic viral and/or bacterial infection, or heavy external parasitism  |
|    | Diffuse hemorrhages, along with a hemorrhagic vent, suggestive of a systemic subacute viral and/or bacterial infection       |
|    | Furuncle suggestive of infection with <i>Aeromonas salmonicida</i>                                                           |
|   | Deep hemorrhagic ulcer suggestive of bacterial infection                                                                     |
|  | Fin erosion and deep ulcer on the caudal peduncle suggestive of flavobacterial infection                                     |
|  | Exophthalmia with an ocular hemorrhage suggestive of a systemic viral and/or bacterial infection                             |
|  | Severely pale gills suggestive of anemia, possibly induced by viral or bacterial infection                                   |
|  | Gills showing extensive tissue loss suggestive of flavobacterial infection and some viral infections (e.g., Koi herpesvirus) |

Tablica 5.3. Primjeri uobičajenih unutarnjih lezija koje ukazuju na stanja bolesti kod uzgojenih riba (Jeney, 2017)

| Abnormal Signs                                                                      | Possible Disease Causes                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Presence of fluids in the abdominal cavity suggestive of a systemic bacterial and/or viral disease                                                                                                                                  |
|    | Hemorrhage in visceral fat suggestive of nutritional deficiency or systemic viral/bacterial disease                                                                                                                                 |
|   | Multiple whitish nodules in the liver suggestive of granulomatous diseases, such as mycobacteriosis, bacterial kidney disease, or piscirickettsiosis. The same lesions can be caused by encysted metacercariae of larval trematodes |
|  | Hemorrhagic inflammation of the intestine suggestive of toxicosis or enteric redmouth disease caused by <i>Yersinia ruckeri</i>                                                                                                     |
|  | Hemorrhages in the swimbladder suggestive of systemic viral and/or bacterial disease                                                                                                                                                |
|  | Whitish nodules in the kidney parenchyma suggestive of bacterial kidney disease                                                                                                                                                     |

### Bakterijske bolesti

Većinu bakterijskih bolesti riba uzrokuju oportunistički gram-negativni bacili (štapici).

Zabilježene su i neke značajne gram-pozitivne bakterijske infekcije (npr. *Streptococcus* spp. i *Renibacterium* spp.; *Mycobacterium* spp. također može zadržati mrlju po Gramu).

Morbiditet i smrtnost često su sekundarni u odnosu na stresore. Sistemske infekcije su najčešće, iako se mogu pojaviti i lokalne infekcije. Klinički znakovi često su nespecifični, a konačna dijagnoza zahtijeva pomoćno testiranje. Liječenje antibioticima trebalo bi se temeljiti na ispitivanju kulture i osjetljivosti (Clinical Guide to Fish Medicine, 2021).

### Gljivične i poput gljivičnih bolesti

Ribe su osjetljive na razne gljivične i poput gljivičnih bolesti. Oomycetes, *Exophiala* spp., *Fusarium* spp., mikrosporidije i mezomicetozoi najčešći su gljivični patogeni.

**Oomycota (saprolegnijaza).** Oomycota, poznata kao oomicete ili vodene plijesni, organizmi su slični gljivicama koji mogu zaraziti kožu ili škrge riba, riblja jaja i bilo koju raspadajuću tvar.

- Oni su uobičajeni oportunistički patogeni slatkovodnih i riba boćatih voda i poseban su problem za soma u akvakulturi.
- Infekcija je često sekundarna zbog traume ili temperaturnih stresora.
- Tipične oomicete mogu se liječiti medicinskim i stočarskim upravljanjem, iako je recidiv čest.
- Atipične oomicete su invazivnije i rezultiraju teškom kroničnom upalom.
- *Aphanomyces invadans* je netipična oomiceta koja uzrokuje sezonsku epizootiju kod divljih i kultiviranim ribama kopnenih i boćatih voda.

### Protozoalne, metazojske, miksozojske i kokcidijske bolesti

*Ichthyophthirius multifiliis* je trepetljikaš ektoparazit koji inficira kožu i škrge slatkovodnih koštunjača. Bolest se često naziva slatkovodnim ichom ili bijelom pjegavošću.

Metazoe su višestanični eukariotski organizmi. Monogenea su jednorodni metilji koji su uobičajeni ektoparaziti riba. Kazalidi su veliki, ovalni, jajorodni monogeni. Inficiraju kožu, oči i škrge morskih riba. Pijavice su hematofagni metazojski paraziti. Često su vidljivi na koži i perajama.

Miksozoi su uobičajeni paraziti divlje ribe i akvakulture u ribnjacima. Većina ovih parazita ima neizravan životni ciklus, koji obično uključuje oligohete, mnogočete ili mahovnjake.

#### 1.3. Glavne bolesti mekušaca, rakova

U svijetu su prazivotinje, Protozoa paraziti najznačajniji uzrok gubitaka u industriji školjkaša. Ova prevlast protozojskih parazita ogleda se u vodiču za bolesti za uzgajivače mekušaca (Elston, 1990). Od 11 'značajnih bolesti kamenica' opisanih u ovom vodiču, sedam uzrokuju protozoe:

- *Perkinsus marina*.
- *Haplosporidium nelson*.
- *Haplosporidium costalis*.
- *Bonamia mackini*.
- *Bonamia ostrea*.

- *Marteilia refringens*.
- *Hexamite nelson*.

Nisu samo protozoe te koje uzrokuju bolest kod mekušaca; uključeni su i virusi i bakterije. Virusi su uzrokovali smrtnost u mrijestilištima i značajne probleme s rastom u uzgoju morskih kozica. Najrazorniji virus poznat do danas je virus sindroma bijele mrlje (WSSV) (Lucas i sur., 2019).

#### 1.4. Širenje patogena u akvakulturi

Širenje patogena proces je ovisan o gustoći i stoga na njega utječu stope skladištenja. Postoji takav odnos da što je veća gustoća, to je manja udaljenost između susjeda. To dovodi do veće vjerojatnosti da patogeni prijeđu udaljenost između domaćina u održivom stanju.

Nepokretni patogeni, kao što su virusi, nepokretne bakterije, sporozoe i jajašca parazita, slijede zakone difuzije. Stoga će se u uvjetima mirne vode oko zaražene osobe stvoriti gradijent koncentracije ovih patogena.

Ostali patogeni, kao što su bakterije, gljivične zoospore, protozoe i metazoe, općenito imaju aktivne, ali promjenjive sposobnosti širenja. Kako se udaljenost povećava, manje patogena moći će doći do osjetljivih domaćina kako bi uspostavili ili nastavili epidemiju bolesti (izbijanje). Budući da postoji prirodno trošenje patogena u okolišu, ako patogen ne dođe do osjetljivog domaćina u određenom razdoblju, šansa za uspostavljanje nove infekcije gotovo je nula (Lucas i sur., 2019).

Objekti s monokulturama u akvakulturi isključuju i grabežljivce i konkurente vrste koja se uzgaja. Isključen je i veliki broj plijena kultiviranih vrsta. Isključivanje životinja koje žive zajedno dovodi do uklanjanja i srednjih i konačnih domaćina iz ekosustava akvakulture. To učinkovito prekida životni ciklus mnogih plošnjaka s više domaćina (npr. dvorodni metilji i trakavice), koji posljedično imaju manju ulogu u bolestima u akvakulturi nego u divljim populacijama. Morski kavezi mnogo su manje učinkoviti u prekidanju ovih životnih ciklusa od ribnjaka ili recirkulacijskih sustava (Lucas i sur., 2019).

Globalno zatopljenje može promijeniti distribuciju i prevalenciju patogena promjenom okolišnih uvjeta i narušavanjem ekosustava. Mogu se pojaviti novi patogeni ili prethodno rijetki patogeni mogu postati češći. Vrste u akvakulturi mogu se susresti s novim ili agresivnijim patogenima za koje nisu prilagođene, povećavajući rizik od izbijanja bolesti i komplicirajući napore u upravljanju.

#### Metode liječenja bolesti riba

Različite metode liječenja i primjene lijekova kontroliraju bolesti riba, kako je opisao Parker (2011).

**Uranjanje.** U metodi uranjanja, jaka otopina kemikalije koristi se relativno kratko vrijeme. Ova metoda može biti opasna jer su korištene otopine koncentrirane. Razlika između učinkovite doze i smrtonosne obično je vrlo mala. Riba se obično stavlja u mrežu i umaču u jaku otopinu kemikalije na kratko vrijeme, obično 15 do 45 sekundi, ovisno o vrsti kemikalije, njezinoj koncentraciji i vrsti ribe koja se tretira.

**Ispiranje.** Ova metoda je relativno jednostavna i uključuje dodavanje osnovne otopine kemikalije na gornji kraj jedinice koja se obrađuje, a zatim joj se dopušta da teče kroz jedinicu. Mora biti dostupan odgovarajući protok vode kako bi se kemikalija mogla isprati kroz jedinicu ili sustav u kratkom vremenu. Ova se metoda ne može koristiti u ribnjacima.

**Produljeno.** Postoje dvije vrste dugotrajnih tretmana: kratkotrajni ili tretman kupke i neodređeno ili trajno liječenje.

**Kupka.** Potrebna količina kemikalije ili lijeka dodaje se izravno u jedinicu za uzgoj ili zadržavanje i ostavlja određeno vrijeme, obično jedan sat. Kemikalija ili lijek se zatim brzo isperu slatkom vodom. S ovim tretmanom mora se poštivati nekoliko mjera opreza kako bi se spriječili ozbiljni gubici. Iako se može preporučiti vrijeme liječenja od jednog sata, ribu treba promatrati tijekom razdoblja liječenja. Na prvi znak nevolje brzo se dodaje svježa voda. Korištenje ove metode zahtijeva izniman oprez kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela kemikalije po cijeloj jedinici, čime se sprječava pojava kemijske vruće točke.

**Neodređeno.** Obično se ova metoda koristi za obradu ribnjaka ili izvlačenje spremnika. Primjenjuje se niska koncentracija kemikalije i ostavlja da se prirodno rasprši. Ovo je općenito jedna od najsigurnijih metoda liječenja. Jedan od glavnih nedostataka su velike količine potrebnih kemikalija, što može biti preskupo. Kao i kod tretmana kupke, kemikalija se mora ravnomjerno rasporediti po cijeloj jedinici kako bi se spriječile vruće točke.

**Hranjenje.** U liječenju nekih bolesti, lijek se daje putem hrane ili na neki način se mora unositi u želudac bolesne ribe. To se može učiniti uključivanjem lijeka u hranu ili vaganjem točne količine lijeka, stavljanjem u želatinsku kapsulu, a zatim pomoću pištolja umetnuti ga u želudac ribe. Ova vrsta liječenja temelji se na tjelesnoj težini.

**Injekcije.** Velike i vrijedne ribe, osobito kada je uključen samo mali broj, ponekad se mogu najučinkovitije liječiti ubrizgavanjem lijeka u tjelesnu šupljinu, intraperitonealno (IP), ili u mišićno tkivo, intramuskularno (IM). Većina lijekova djeluje brže kada se ubrizgava IP nego IM. IP injekcije zahtijevaju oprez kako bi se spriječilo oštećenje unutarnjih organa. Najlakše mjesto za IP injekcije je baza jedne od trbušnih peraja. Za intravenozne injekcije, najbolje mjesto je obično područje neposredno uz leđnu peraju (Parker, 2011).

Promjene u uvjetima okoliša mogu dovesti do promjena u populacijama patogena i pojave novih ili virulentnijih patogena, pojave prethodno neprepoznatih bolesti, povećanog broja izbijanja bolesti i izazova u dijagnostici i liječenju.

## 2. Zaštitne mjere i biotehnološke primjene za ublažavanje utjecaja bolesti

Upravljanje zdravljem riba odnosi se na prakse osmišljene za sprječavanje bolesti riba. Jednom kada se ribe razbole, spašavanje je složeno. Uspješno upravljanje zdravljem riba počinje prevencijom bolesti, a ne liječenjem. Dobro upravljanje kvalitetom vode, prehrana i sanitarni uvjeti sprječavaju bolesti riba. Bez ove osnove nemoguće je spriječiti izbijanje oportunističkih bolesti. Riba se neprestano kupu u potencijalnim patogenima, uključujući bakterije, gljivice i parazite. Loša kvaliteta vode, neadekvatna prehrana ili supresija imunološkog sustava, često povezana sa stresnim stanjima, omogućuju ovim potencijalnim patogenima da uzrokuju bolest. Lijekovi koji se koriste za liječenje bolesti kupuju vrijeme ribama i omogućuju im da prevladaju oportunističke infekcije, ali nisu zamjena za pravilan uzgoj (Parker, 2011).

Globalno zatopljenje zahtijeva redovito i sveobuhvatno praćenje kvalitete vode, razine patogena i zdravstvenih pokazatelja. Ovo praćenje uključuje korištenje naprednih dijagnostičkih alata i tehnika nadzora za brzo otkrivanje i rješavanje izbijanja bolesti.

## 2.1. Filozofija kontrole bolesti

Kontrola bolesti u akvakulturi obično se pokušava pod pretpostavkom da je odsutnost patogena željeno stanje. Međutim, vjerojatnost pokretanja akvakulture bez ikakvih potencijalnih patogena u sustavu vrlo je mala i postavlja se pitanje je li isplativo postići stanje bez patogena. Ova strategija 'potpune eliminacije patogena' klasičan je pristup kontroli bolesti: patogenocentrični pristup (Lucas i sur., 2019).

Nekoliko je čimbenika koje treba uzeti u obzir pri odlučivanju o mjerama kontrole u akvakulturi:

- **Trošak kontrolne mjere.** Neki patogeni čine kulturu neekonomičnom u svojoj prisutnosti i moraju se ukloniti iz sustava kulture.
- **Vjerojatnost ponovne infekcije.** U idealnom slučaju, ne bi trebalo biti gotovo nikakve šanse da se patogen ponovno pojavi iz okoliša ili divljih stokova u blizini. Alternativno, infekcija patogenom i naknadno liječenje često omogućuju imunološki sustav kralježnjaka da se pripremi, čime se ograničavaju daljnje infekcije.
- **Adekvatan test za patogen.** Mora biti moguće točno identificirati patogen kako bi se procijenio učinak mjera kontrole na njega.

### *Generalizirane tehnike upravljanja bolestima*

Najznačajniji čimbenik u kretanju i unošenju patogena na farme, i to na bilo kojoj geografskoj razini, je kretanje životinja. To uključuje:

- matični stok
- ličinke za nasad;
- alternativni domaćini;
- smrznuti proizvodi za ljudsku prehranu
- hrana za akvakulturu; i
- mamac.

Većina novih unosa patogena u nezaražene sustave posljedica je nekontroliranog kretanja kontaminiranih životinja. Ponekad je to neizbježno jer akvakultura ne postoji bez matičnog stoka ili ličinki za nasad. Međutim, biološka sigurnost matičnog stoka, često se zanemaruje i treba je prvo razmotriti. Stoga je u Europi obvezno testirati matični stok na širok raspon bolesti koje se moraju prijaviti (bakterijske i virusne) prije nego što se dopusti prijenos (Lucas i sur. (2019.).

Ako nije dostupan matični stok bez patogena, koji je zdravstveni status koje se koristi? Na primjer, u akvakulturi morskih riba i akvakulturi škampa, virusna encefalopatija i retinopatija i virus sindroma bijele pjegavosti šire se okomito od matičnog stoka do ličinki, a zatim se distribuiraju kroz zaražene postličinke i mlađ na farmi.

Premda ne postoji univerzalna strategija za suzbijanje svih patogena, niz postupaka može pomoći u njihovom ograničavanju unutar sustava akvakulture (Lucas i sur., 2019).

- **Serijska kultura.** Funkcionira po principu 'all in, all out'.

- **Obrada dolazne vode.** Ključna je za recirkulacijske sustave akvakulture, a posebno korisna u mrijestilištima, gdje je količina obrađene vode manja nego kod uzgoja. Obrada vode uključuje kemijsku sterilizaciju (klor, jodofori, ozon) i fizičku sterilizaciju (UV svjetlo).
- **Niža gustoća nasada.** Smanjenjem gustoće nasada povećava se prosječna udaljenost "među ribama", a vjerojatnost da patogen dođe do sljedećeg domaćina smanjuje se na eksponencijalnoj skali. Na teoretskoj osnovi, epidemije bolesti će izumrijeti osim ako na određenom području nije prisutan granični broj domaćina. Pojednostavljeno, svaki zaraženi domaćin mora zaraziti najmanje dva druga domaćina dok podlegne, inače se epidemija neće širiti. Nadalje, smanjenje gustoće nasada također će smanjiti razinu stresa izazvanog interakcijom i natjecanja za prostor i hranu.
- **Nasad od jednog mrijesta.** Diferencijalni rast dobar je pokazatelj lošeg zdravlja u uzgoju. Ako se mješovita populacija mrijesta koristi za nasad u akvakulturoi, diferencijalni rast zbog starosti, genetike ili varijacija u uvjetima izlijevanja prikrit će diferencijalni rast uzrokovan patogenima. Stoga je nasad jednim mrijestom od posebne koristi. Ova tehnika nije toliko korisna kod mnogih vrsta riba gdje je ocjenjivanje veličine normalan dio kulture (npr. jegulje, losos i pastrva), ali dobro funkcionira za beskralješnjake (npr. slatkovodne rakove). Ova tehnika također naglašava problem vrlo česte prakse među uzgajivačima ribe. Prilikom izlova, većina uzgajivača ostavlja nedorasle jednike koji su premali da zadovolje potrebe tržišta u ribnjaku kako bi im omogućili da narastu do veličine tržišta. To zanemaruje najvjerojatnije razloge njihovog neuspjeha da dosegnu veličinu tržišta a to je prijemljivost na bolesti. Stoga, u stvarnosti, uzgajivač drži rezervoar oboljelih jedinki na uzgajalištu kako bi zarazio sljedeći nasad.
- **Matični stok bez specifičnih patogena.** Većina patogena pokazuje veću virulentnost prema mlađim stadijima domaćina. Ako se potomstvo uzgaja iz legla bez specifičnih patogena, postoji velika šansa da naraste do veličine na kojoj je manje osjetljivo na infekcije prije nego što dođe u kontakt s patogenima, pa se uzgoj može proizvesti čak i na području gdje se bolest redovito pojavljuje. Ova metoda može biti učinkovita i ako su sve životne faze jednako osjetljive, jer se usjev može uzgajati do faze žetve prije nego što se bolest uspije uspostaviti.
- **Smanjenje stresa.** Stres se često navodi kao uzrok problema kada nije dostupno drugo logično objašnjenje. Unatoč često nepreciznom korištenju pojma stresa, on ima stvarnu fiziološku osnovu i značajne posljedice. epovoljni uvjeti izazivaju adaptivni odgovor, pri čemu se uspostavlja nova razina homeostaze. Ako organizam ne uspije uspostaviti homeostazu, dolazi do iscrpljenosti i prekomjerne proizvodnje hormona stresa. Dva najučinkovitija načina smanjenja stresa uključuju povećanje prozračivanja, što ublažava manjak kisika, posebno tijekom vrućih ljeta, te smanjenje gustoće nasada.
- **Cijepljenje.** Cijepljenje u osnovi djeluje na pretpostavci da imunološko pamćenje postoji i da će prethodno izlaganje patogenu omogućiti jači i brži imunološki odgovor (Lucas i sur. (2019)).

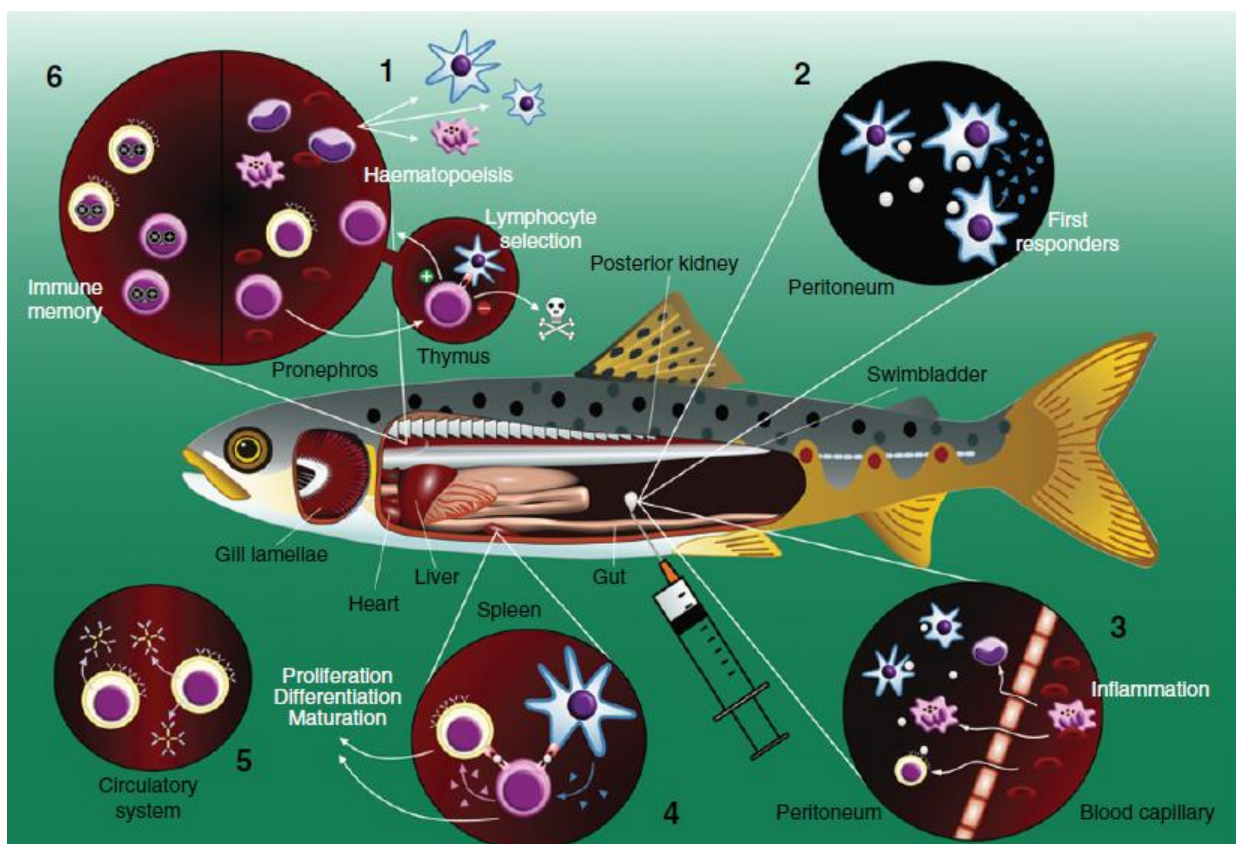
## 2.2. Biotehnologije u upravljanju bolestima

### *Cijepljenje riba*

Izraz cjepivo sada se općenitije koristi za definiranje bilo kojeg pripravka koji se koristi za davanje imuniteta na bolest cijepljenjem, a princip se oslanja na to da primatelj ima adaptivni imunološki sustav koji pokreće odgovor na komponente cjepiva što rezultira pamćenjem tih komponenti. Imunološki sustav cijepljene jedinke tada može brže reagirati i aktivirati snažnije zaštitne efektorske mehanizme pri budućim susretima s istim antigenima (slika 6) (Lucas i sur. (2019).

Imunizacija riba akvakulture započela je više od 50 godina. Cijepljenje je učinkovito sredstvo za prevenciju bakterijskih i virusnih bolesti. Cijepljenje također doprinosi ekološki, socijalnoj i ekonomskoj održivosti industrije akvakulture. Nažalost, razvoj cjepiva u akvakulturi znatno zaostaje za stočarskom industrijom. U industriji je registrirano i primijenjeno tek nekoliko cjepiva. Nadalje, cijepljenje riba radno je intenzivan proces, u kojem se pojedinim ribama ručno ubrizgava doza cjepiva. Oralna cjepiva predstavljaju alternativu intenzivnom tradicionalnom cijepljenju injekcijama, smanjuje rukovanje i oštećenje riba, čime se smanjuje stopa smrtnosti tijekom cijepljenja. Mikroinkapsulacija, u koju je ugrađen antigen iz patogena, mogla bi biti tehnologija za isporuku oralnih cjepiva ribama. Postoje mogućnosti za razvoj inovativnih cjepiva prilagođenih sustavima oralne primjene. Međutim, čini se da trenutno ne postoji učinkovito oralno cjepivo dostupno u industriji akvakulture (Yue i Shen, 2021).

Zbog globalnog zatopljenja potrebno je razviti i primijeniti cjepiva za zaštitu vrsta akvakulture od određenih bolesti. Ključna su stalna istraživanja novih cjepiva i strategija imunizacije. Ključan je razvoj i provedba učinkovitih programa cijepljenja kako bi se spriječila pojava bolesti uzrokovanih klimatskim promjenama.



Slika 5.4. Shematski prikaz parra atlantskog lososa koji prikazuje primarna imunološka tkiva i napredovanje odgovora na cijepljenje intraperitonealnom injekcijom (Lucas i sur., 2019).

### Imunomodulatori i imunostimulansi

Tvari koje induciraju, pojačavaju ili potiskuju imunološki odgovor zajednički se nazivaju imunomodulatorima, a one imaju potencijal značajno smanjiti gubitke povezane s bolešću u akvakulturi. Postoji raznolik raspon tvari (rekombinantnih, sintetičkih i prirodnih) koje nude atraktivnu alternativu antibioticima jer općenito imaju manje nuspojava od postojećih lijekova i manja je vjerojatnost da će patogen razviti otpornost na njih (Jeney, 2017).

Imunostimulansi su tvari koje potiču imunološki odgovor riba induciranjem ili povećanjem imunološke aktivnosti ribe, bilo putem odgovora specifičnih za antigen, kao što su cjepiva, ili nespecifično, neovisno o prepoznavanju antigena, kao što su adjuvansi ili nespecifični imunostimulansi. Adjuvansi se dodaju cjepivima kako bi se pojačalo stvaranje jačeg zaštitnog odgovora na antigene prisutne u cjepivu i kako bi se osigurala povećana zaštita od patogena. Citokini koje proizvodi stanični imunološki sustav također funkcioniraju kao imunostimulansi, poboljšavajući imunološku funkciju.

Imunostimulansi se dobivaju iz prirodnih i sintetičkih izvora. Primjeri imunostimulansa uključuju  $\beta$ -glukane, hitin, laktoferin, levamisol, vitamine B i C, hormon rasta i prolaktin. Pokazalo se da imunostimulansi poboljšavaju otpornost riba na bolesti i pojačavaju njihov imunološki odgovor u vrijeme stresa. Njihova je upotreba sada uobičajena u programima kontrole bolesti kako bi se spriječile zarazne bolesti u akvakulturi, pogotovo jer se njima riba može lako hraniti.

$\beta$ -glukani su najčešće korišteni imunostimulansi u akvakulturi, posebno  $\beta$ -glukani ( $\beta$ -1,3 i 1,6-glukani) dobiveni iz stanične stijenke pekarskog kvasca *Saccharomyces cerevisiae*. Međutim, istraženi su i drugi izvori  $\beta$ -glukana (Jeney, 2017).

### **Probiotici, prebiotici i adaptivno hranjenje**

Probiotici su živi mikroorganizmi, dobiveni iz 'normalnih' okolišnih ili crijevnih bakterija koje imaju potencijal pružiti zdravstvene koristi kada se daju ribama. Definirani su kao "korisni živi mikroorganizmi kada se daju domaćinu u učinkovitoj dozi". Odabrane bakterije unutar vrsta *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Carnobacterium*, *Shewanella*, *Bacillus*, *Aeromonas*, *Vibrio*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Saccharomyces*, *Pediococcus* i *Streptococcus* istraženi su kao potencijalni probiotici za akvakulturu. Djelovanje probiotika temelji se na njihovoj sposobnosti da stimuliraju rast specifičnih mikroba u crijevnom traktu ribe. Oni održavaju mikrobnu ravnotežu crijeva natječući se s patogenim bakterijama za mjesta pričvršćivanja na crijevnoj sluznici, a također se natječući za hranjive tvari. Imaju antagonističko djelovanje protiv patogena jer proizvode različite antimikrobne tvari (baktericidne ili bakteriostatske) koje sprečavaju replikaciju i/ili ubijaju patogene, čime sprečavaju patogene da koloniziraju crijeva ribe. Oni također izravno pojačavaju odgovor imunološkog sustava domaćina protiv patogena (Jeney, 2017).

Prebiotici su neprobavljivi ugljikohidrati koji pružaju zdravstvene prednosti kada se daju domaćinu stimulirajući rast i/ili aktivnost odabranih bakterija u crijevima životinje. Fermentabilni ugljikohidrati smatraju se najperspektivnijim od njih, pozitivno utječući na sastav i aktivnost autohtone mikroflore u crijevnom traktu. Nekoliko potencijalnih prebiotičkih ugljikohidrata testirano je u akvakulturi. Prebiotici se metaboliziraju u crijevima domaćina bakterijama kao što su *Lactobacillus* i *Bifidobacterium*, a oni, pak, proizvode metabolite poput kratkolančanih masnih kiselina, koji su važni za zdravlje debelog crijeva. Oni također smanjuju razinu crijevnih patogena prisutnih u crijevima (Jeney, 2017).

Upotreba probiotika i imunostimulansa u hrani za jačanje imunološkog sustava vrsta akvakulture, povećanje njihove otpornosti na bolesti, jedan je od važnih čimbenika za smanjenje učinaka klimatskih promjena.

Korištenje probiotika i imunostimulansa u hrani za jačanje imunološkog sustava i otpornosti vrsta akvakulture na bolesti jedan je od ključnih čimbenika za ublažavanje učinaka klimatskih promjena. S obzirom na utjecaj promjena u okolišu na rast i zdravlje, potrebno je modificirati formulacije hrane i prehrambene prakse. To zahtijeva prilagodbu profila hranjivih tvari na temelju temperature i kvalitete vode te osiguravanje specijalizirane hrane za podršku imunološkoj funkciji i otpornosti na stres. Istovremeno je potrebno kontinuirano pratiti učinkovitost hrane i prilagođavati je prema potrebama. Što bi trebalo promijeniti hranu i hranidbu u akvakulturi zbog globalnog zatopljenja opisano je u zasebnom poglavlju.

## **2.3. Integrirane strategije upravljanja patogenima u uzgoju ribe**

Utjecaj patogena na akvakulturu je znatan – procjenjuje se da financijski gubici iznose otprilike 20% ukupne vrijednosti proizvodnje. Glavni cilj integriranog upravljanja patogenima (IPM) je kombinirati sve dostupne preventivne i kurativne metode kako bi se smanjio utjecaj patogena u proizvodnom

lancu, a istovremeno smanjio utjecaj na okoliš i izbjegle buduće nuspojave, čime se povećava održivost, kako na ekonomskoj tako i na ekološkoj razini (Jeney, 2017).

Pojam integrirane zaštite bilja obuhvaća sljedeće:

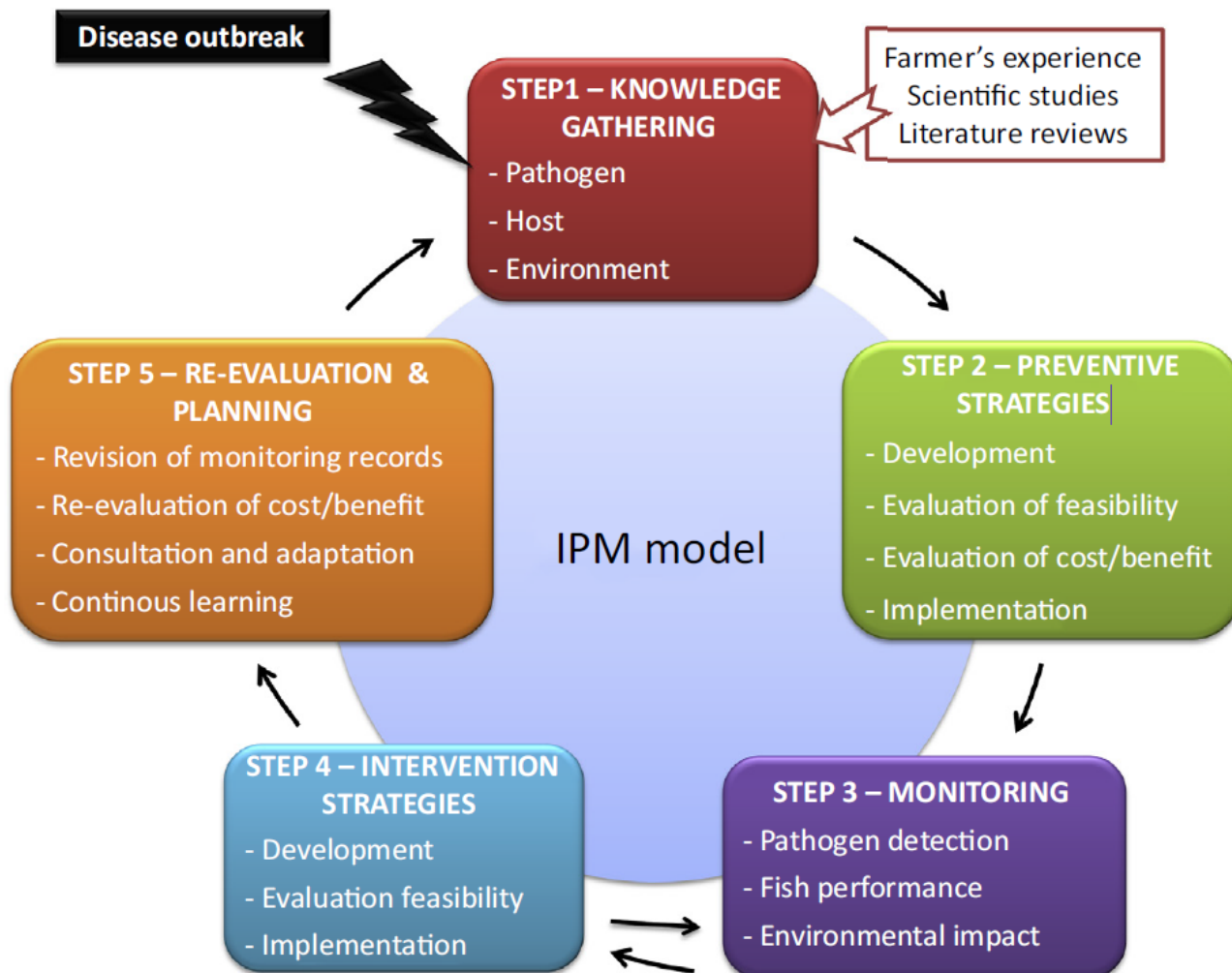
**Integrirani.** To je holistički pristup, jer kombinira sve dostupne strategije za kontrolu bolesti, s fokusom na interakcije između patogena, domaćina i okoline. Odnos između ova tri čimbenika je složen, jer sama prisutnost patogena ne mora nužno dovesti do razvoja bolesti. Ova interakcija, iako komplicira epizootologiju bolesti, pruža mogućnosti da se utjecaj infekcije smanji na najmanju moguću mjeru.

**Patogen.** To znači bilo koji organizam koji je u sukobu s biljnom ili životinjskom proizvodnjom. Ako organizam nema dubok utjecaj, ne vrijedi razvijati IPM za njega. IPM posebno dobro djeluje na patogene sa složenim životnim ciklusom, pružajući višestruke mogućnosti za intervenciju.

**Upravljanje.** To je način da se patogeni zadrže ispod razine na kojoj mogu prouzročiti ozbiljnu ekonomsku štetu. To ne znači uvijek iskorjenjivanje patogena. To znači pronalaženje strategija koje su učinkovite i ekonomične kako bi se svela šteta u okolišu na minimum.

Razvoj IPMS-a je proces koji se sastoji od nekoliko koraka sažetih na slici 5.5. (Jeney, 2017). Proces se pokreće kada patogen izazove izbijanje bolesti. **Prvi korak** sastoji se od prikupljanja svih mogućih **znanja** o ključnim patogenima (životni ciklus, strategije invazije domaćina, prirodni neprijatelji, vektori itd.), kao i čimbenicima rizika domaćina i okoliša koji pogoduju širenju patogena i utjecaju unutar riblje populacije. Ove informacije u početku dolaze iz iskustva uzgajivača, znanstvenih studija i pregleda literature. **Drugi korak je prevencija**; podrazumijeva razvoj, procjenu izvedivosti i troškova i koristi te provedbu najboljih preventivnih strategija za svaki patogen. **Treći korak** je praćenje bolesti, što uključuje otkrivanje patogena, nadzor performansi domaćina i mogući utjecaj na okoliš. Kada prevencija nije dovoljna za zaustavljanje bolesti, **četvrti korak** je intervencija; to znači razvoj, procjena izvedivosti i troškova/koristi, te provedba fizikalnih, kemijskih i/ili bioloških tretmana. Praćenje se događa i nakon intervencije. **Peti korak** je ponovna procjena i planiranje s obzirom na rezultate dobivene iz različitih strategija, budući da se IPMS mora stalno procjenjivati i usavršavati kako bi se maksimizirale njihove koristi, revizijom evidencije bolesti, ponovnom procjenom troškova/koristi, savjetovanjem i prilagodbom inovacijama te kontinuiranim učenjem. U idealnom slučaju, dugoročno bi trebalo omogućiti definiranje modela predviđanja. Završni korak vraća se na početak ciklusa, doprinoseći kontinuiranom proširenju baze znanja. Ovo poglavlje opisuje dostupne strategije za većinu ovih koraka u uzgoju ribe, trenutne ograničavajuće čimbenike njihove

primjene u proizvodnim pogonima te buduće perspektive (Jeney, 2017).



Slika 5.5. Proces razvoja strategija integriranog upravljanja patogenima (IPM) za bolesti riba (Jeney, 2017)

Globalno zatopljenje ima značajan utjecaj na učestalost bolesti i njihovo upravljanje u sustavima akvakulture. Razumijevanje interakcija između promjena u okolišu i dinamike bolesti omogućuje akvakulturnim operacijama primjenu učinkovitih strategija upravljanja za ublažavanje tih utjecaja. Poboljšano praćenje, regulacija temperature i kvalitete vode, učinkovito upravljanje zdravljem te otpornost infrastrukture ključni su za očuvanje zdravlja i produktivnosti vrsta akvakulture unatoč klimatskim promjenama.

### Osnovni zahtjevi za biosigurnost u farmi akvakulture

Osnovni zahtjevi (tipični u Litvi) za biosigurnost u uzgajalištu akvakulture su:

1. Svako poduzeće akvakulture mora imati plan biološke sigurnosti kako bi se spriječio ulazak kontaminacije u uzgajalište i/ili širenje zaraze izvan uzgajališta.
2. Kotači svakog vozila ili drugog prijevoza koji ulaze moraju se dezinficirati.
3. Pratite parametre kvalitete vode u ribnjacima i ribnjacima.
4. Prostirke ili kade za dezinfekciju moraju biti postavljene na svakom ulazu/izlazu iz prostorija, unutar i izvan zgrade.

5. Zaposlenici se moraju presvući u radnu odjeću kada dođu na posao i ponovno se presvući kada odu.
6. Zaposlenici koji rade u odjelima različitih faza rasta ribe moraju dezinficirati ruke svaki put kada se presele iz jedne prostorije u drugu.
7. Alati za lov, transport, hranjenje i čišćenje ribe ne mogu se koristiti u nekoliko prostorija.
8. Korišteni alati i oprema moraju se čuvati u fiziološkoj otopini do sljedeće uporabe.
9. Ograničite broj posjetitelja, a po dolasku ih registrirajte i koristite jednokratnu odjeću za zaštitu.
10. Radnici mogu raditi samo na jednom uzgajalištu akvakulture kako bi se izbjegao prijenos patogena.

Plan upravljanja zdravljem riba na razini postrojenja izuzetno je vrijedan, ali možda nije dovoljan za sprječavanje širenja patogena između širih geografskih područja. Stoga je nužna provedba politika i propisa na regionalnoj, nacionalnoj i međunarodnoj razini (Jeney, 2017).

### **Ostale zaštitne mjere za smanjenje utjecaja klimatskih promjena i bolesti**

Vrlo je važno za infrastrukturu akvakulture odabrati lokacije koje smanjuju rizik od prijenosa bolesti i minimiziraju utjecaj klimatskih promjena.

Ovisno o vrsti sustava uzgoja i vrsti koja se uzgaja, pravilan odabir mjesta može značajno smanjiti rizik od prijenosa bolesti. Odgovarajuće lokacije osiguravaju optimalne ekološke uvjete, poput temperature vode i saliniteta, čime se smanjuje fiziološki stres te učestalost i ozbiljnost zaraznih bolesti u objektu. Također treba uzeti u obzir kvalitetu dostupne vode. Količina vode i njezina promjenjiva dostupnost tijekom vremena mogu ograničiti proizvodne kapacitete. Objekti s nedovoljnim zalihama vode često su pogođeni lošim učinkom ribe, većim brojem problema s bolestima i smanjenom profitabilnošću. Kod zemljanih ribnjaka ključno je osigurati da tlo nije kontaminirano spojevima koji bi mogli dospjeti u vodeni stupac, ugroziti zdravlje riba ili kontaminirati riblje meso (Tucker i Hargreaves, 2009).

Ekstremni vremenski uvjeti mogu uzrokovati fizičku štetu infrastrukturi akvakulture, dovesti do naglih promjena u kvaliteti vode i unijeti patogene i onečišćujuće tvari u sustave akvakulture. To može rezultirati izbijanjem bolesti i poremećajima u radu.

Posljedice globalnog zatopljenja mogu dovesti do fizičkih oštećenja spremnika i kaveza, pogoršanja kvalitete vode te povećanja učestalosti bolesti zbog kontaminacije ili stresa. Također, mogu se pojaviti operativni izazovi u upravljanju i održavanju sustava akvakulture.

Odgovarajuća mjesta također smanjuju vjerojatnost da će prirodni fenomeni (kao što su poplave, olujni udari ili velika mora) uzrokovati povrede biosigurnosti objekata koji omogućuju oslobađanje patogena ili bijeg zaraženih plodova. Odabirom lokacije također treba uzeti u obzir jesu li osjetljive populacije divlje ribe izložene riziku. Osjetljive populacije mogu uključivati ugrožene ili ugrožene vrste ili migrirajuće populacije osjetljivih vrsta (Tucker i Hargreaves, 2009).

Zbog globalnog zatopljenja možda će biti potrebno ojačati postojeću strukturu, podići objekte kako bi se spriječila šteta od poplava i ugraditi fleksibilne i otporne sustave, razviti i održavati planove za

hitne slučajeve za rješavanje štete na infrastrukturi, problema s kvalitetom vode i izbijanja bolesti uzrokovanih ekstremnim vremenskim prilikama.

Mogu se odabrati vrste akvakulture s većom toplinskom tolerancijom kako bi bolje izdržale više temperature i smanjile osjetljivost na bolesti.

U recirkulacijskim akvakulturnim sustavima (RAS) mogu se primijeniti različite mjere i inovativna rješenja. Održavanje optimalnih temperaturnih raspona može pomoći u upravljanju stresom i smanjenju rizika od bolesti. Kao preventivne mjere mogu se implementirati tehnologije kontrole temperature s mogućnošću podešavanja postavki na temelju podataka u stvarnom vremenu. Redovito praćenje i optimizacija parametara kvalitete vode, poput pH vrijednosti, otopljenog kisika i razina hranjivih tvari, mogu se automatizirati. Mogu se primijeniti tehnike kao što su zasjenjivanje, prozračivanje i kontrolirano hranjenje kako bi se ublažili učinci temperature i drugih stresora iz okoliša na sustave akvakulture.

Odabir sustava i prilagodba akvakulture na globalno zatopljenje detaljno su obrađeni u zasebnom poglavlju.

### 3. Klimatski utjecaji na bolesti i buduća rješenja

#### 3.1. Utjecaj klimatskih čimbenika

**Intenziviranje.** Intenziviranje proizvodnje, čak i u stabilnim okolišnim uvjetima, nosi rizike i izazove održivosti koji zahtijevaju strogo upravljanje radi pravovremenog odgovora na otkrivanje patogena ili izbijanje bolesti. Klimatske promjene povećat će te prijetnje i izazove.

Za veliku proizvodnju jedne vrste u proizvodnom okruženju potrebno je:

- 1) brz odgovor na životinje koje ne uzimaju hranu, znakove morbiditeta i smrtnosti;
- 2) sposobnost izolacije jedinki s vidljivim znacima od nezahvaćenih populacija i farmi; i
3. kapacitet za depopulaciju zahvaćenih mjesta na kojima liječenje nije izvedivo.

Ekstremni vremenski uvjeti sve više utječu na intenzivnu akvakulturu, uzrokujući stres kod uzgojenih životinja i narušavajući upravljačke mehanizme, poput sprečavanja bijega (oštećenje sustava držanja) i izolacije bolesnih ili pod stresom pogođenih jedinki od zdravih populacija (Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options, 2018).

**Vrste i genetska diverzifikacija.** Tijekom posljednjih 30 do 40 godina akvakultura se razvila korištenjem diverzifikacije vrsta (odabir vrsta koje pokazuju najbolje rezultate proizvodnje u uvjetima uzgoja) i genetskih sojeva razvijenih u eksperimentalnim uvjetima za komercijalnu proizvodnju.

Obje metode selekcije obuhvaćaju toleranciju na bolest (infekcija bez značajne smrtnosti) i rezistenciju (sposobnost organizma da spriječi infekciju). Međutim, prednosti odabira vrsta i sojeva oslanjaju se na dosljedne ekološke parametre u proizvodnom sustavu, odnosno bez značajnih promjena uvjeta proizvodnje. Ako su takvi uvjeti podložni "ekstremnim uvjetima" (temperatura, salinitet, zamućenost), odabrane vrste i/ili sojevi mogu biti osjetljiviji na velike gubitke od manje odabranih i genetski raznolikijih stokova; posebno onih koji su autohtoni u proizvodnom području

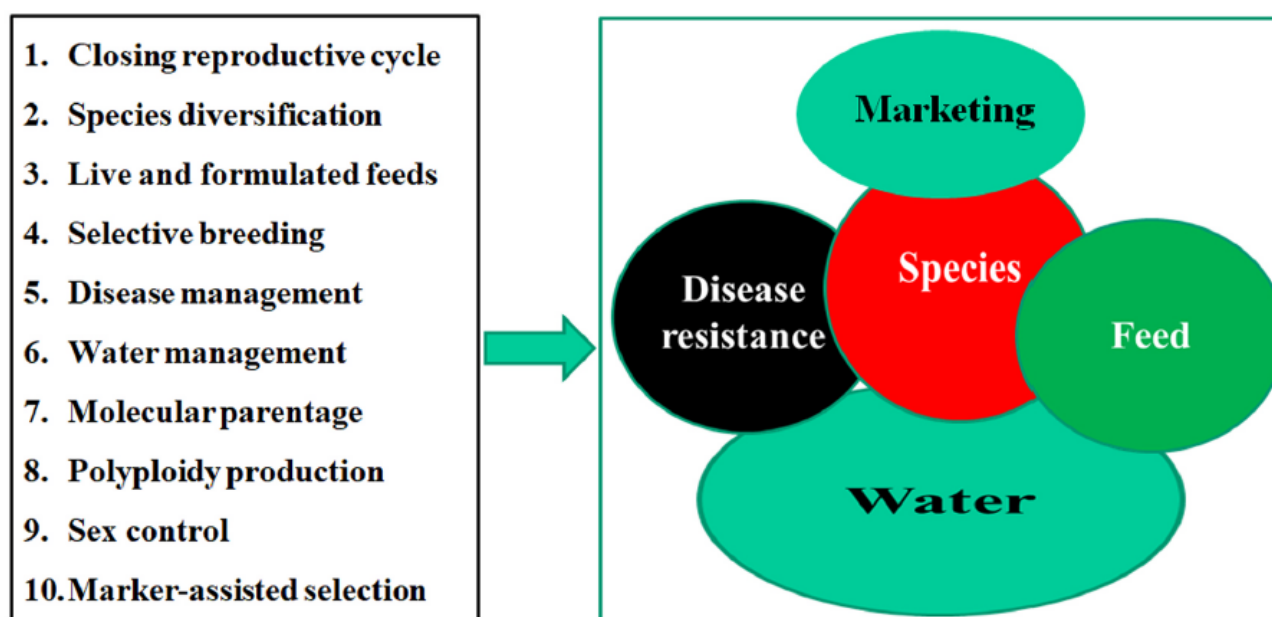
(Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options, 2018).

**Širenje izvan zemljopisnog područja prirodnih vrsta** Autohtone vrste koje se koriste u akvakulturi i koje pokazuju snažnu poljoprivrednu proizvodnju često su podložne širenju farmi na periferije ili izvan svog prirodnog zemljopisnog područja. Životinje mogu izdržati blage sezonske promjene temperature i/ili saliniteta, ali su u nepovoljnom položaju za preživljavanje kada ekstremni uvjeti utječu na normalne proizvodne cikluse reprodukcije ili rasta.

Kod intenzifikacije i povećane genetske raznolikosti, promjene u okolišu mogu znatno smanjiti otpornost na oportunističke ili primarne patogene infekcije (Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options, 2018).

### 3.2. Genetski inženjering, odabir potpomognut markerima i CRISPR

Biotehnološke metode, poput kontrole spola, poliploidizacije, ginogeneze i androgeneze (Slika 5.6.), značajno su doprinijele povećanju produktivnosti akvakulture (Yue i Shen, 2021).



#### A. Technologies applied to aquaculture    B. Important components in aquaculture

Slika 5.6. Tehnologije koje se primjenjuju u akvakulturi koje dovode do brzog povećanja proizvodnje akvakulture (Yue i Shen, 2021)

Genetsko poboljšanje kroz uzgoj bilo je ključno za procvat svjetske akvakulture. Kombinacija molekularnih tehnologija u postojećim programima uzgoja značajno je ubrzala genetsko poboljšanje nekih vrsta akvakulture. Selekcija potpomognuta markerima (MAS) već je primijenjena za poboljšanje otpornosti na bolesti (na primjer, otpornost na IPN kod lososa) (Yue i Shen, 2021.).

Genomska selekcija (GS) je novi pristup molekularnom uzgoju. GS koristi brojne markere kao prediktore performansi, što rezultira točnijim procjenama uzgojnih vrijednosti. S kontinuiranim

napretkom u sekvenciranju i bioinformatičkim tehnologijama te smanjenjem troškova genotipizacije SNP-a (jednonukleotidnog polimorfizma), GS, koji koristi SNP-ove pokrivajući cijeli genom ili odabrane SNP-ove povezane sa specifičnim svojstvima, sve se više primjenjuje u različitim vrstama akvakulture radi optimizacije selektivnog uzgoja i ubrzanja genetskog poboljšanja. (Yue i Shen, 2021).

Uređivanje genoma (GE) pomoću CRISPR/Cas može ubrzati genetsko poboljšanje vrsta akvakulture kada su poznati geni koje treba uređivati. GE omogućuje brzo uvođenje povoljnih alela u genom, povećava učestalost poželjnih alela na ključnim lokusima, omogućuje stvaranje novih alela te potencijalno uvođenje korisnih alela iz drugih vrsta. Vrste akvakulture posebno su pogodne za GE zbog svoje visoke plodnosti i vanjske oplodnje, što omogućuje uređivanje genoma za mnoge jedinke istovremeno.

Napredak u GS-u i GE-u može značajno transformirati industriju akvakulture poboljšavajući ekonomski važna svojstva brojnih vrsta. U budućnosti će integracija GS-a i GE-a s naprednim konvencionalnim strategijama uzgoja i etabliranim biotehnologijama znatno ubrzati genetsko poboljšanje u akvakulturi (Yue i Shen, 2021.). Globalno zagrijavanje i razmnožavanje, biotehnologija u akvakulturi opisana je u zasebnom poglavlju.

### **3.3. Odgovor na izazove budućnosti**

Novi pristupi smanjili su učestalost bolesti i oslanjanje na antibiotike i kemijske terapije. U Norveškoj su razvoj cjepiva i poboljšana biosigurnost (kontrola i suzbijanje bolesti) uvelike smanjili potrebu za antibioticima u proizvodnji lososa. Potrebna ulaganja u biosigurnost kako bi se rizik od izbijanja bolesti sveo na najmanju moguću mjeru razlikovat će se ovisno o mjestu i opsegu, ali potreba za poboljšanjem dijagnostičkih i nadzornih kapaciteta nacionalnih veterinarskih službi jedan je od zajedničkih elemenata. Unatoč stalnoj izloženosti akvakulture novim bolestima, razvoj novih tehnologija upravljanja zdravljem omogućit će učinkovite odgovore na te izazove. Troškovi sekvenciranja genoma značajno se smanjuju. To će omogućiti razvoj dijagnostičkih metoda testiranja te lijekova i drugih terapija prilagođenih specifičnim sojevima patogena, u obliku prilagođenog liječenja bolesti. (Lucas i sur., 2019).

Ključni megatrend je ubrzanje tehnoloških promjena, posebno biotehnologije, nanotehnologije te informacijske i računalne tehnologije. Istraživanje i razvoj znanosti i tehnologije diljem svijeta ubrzavaju se zahvaljujući gospodarskom rastu i javnim ulaganjima. Senzori, softver i bežična veza omogućuju prikupljanje i analizu podataka u stvarnom vremenu. Povezani na izlazne uređaje, oni omogućuju pravovremene odgovore na unos podataka. Primjerice, video nadzor hranjenja lososa omogućuje precizniju kontrolu hranjenja, poboljšanu konverziju hrane, smanjeno bacanje i manje zagađenja. Senzori kisika u ribnjacima povezani sa softverom za analizu i kontrolu mogu aktivirati aeratore za kontrolu koncentracije kisika u ribnjaku. Koncept 'Interneta stvari' bit će podržan razvojem senzora, automatizacije, autonomnih strojeva, bespilotnih letjelica i podvodnih dronova. Digitalne i robotske tehnologije sve će više povećavati ili zamjenjivati radnike (Lucas i sur., 2019).

Tehnološki napredak ključan je za povećanje produktivnosti i ekološke održivosti akvakulture. Ključna područja za inovacije su hrana za životinje, genetsko poboljšanje, kontrola bolesti,

proizvodnja sjemena i sustavi proizvodnje uzgoja (Lucas i sur. (2019.). Ključno je ulagati u istraživanje kako bi se razumjeli učinci globalnog zatopljenja na dinamiku bolesti i razvila inovativna rješenja za prevenciju i upravljanje bolestima.

Intenzivna suradnja s istraživačima i institucijama na istraživanju novih tehnologija, sojeva otpornih na bolesti i prilagodljivih praksi upravljanja trebala bi biti način za minimiziranje utjecaja globalnog zatopljenja i učinkovite prakse upravljanja bolestima.

Akvakultura sve više zahtijeva obrazovane praktičare i stručnjake. Radionice za obuku, webinar i resursi o prevenciji bolesti, upravljanju okolišem i adaptivnim strategijama vrlo su korisni i potrebni.

## Sažetak

Globalno zatopljenje utječe na zdravlje i upravljanje vrstama akvakulture putem različitih mehanizama, uključujući povećanu prevalenciju bolesti, ugroženu imunološku funkciju i degradiranu kvalitetu vode. Učinkovito upravljanje zahtijeva sveobuhvatan pristup koji uključuje poboljšano praćenje, kontrolu okolišnih uvjeta, upravljanje kvalitetom vode i zdravljem, riba, otpornost infrastrukture te prilagodljive prehranbene strategije. Primjenom ovih strategija te kontinuiranim praćenjem novih izazova i rješenja, operacije akvakulture mogu bolje zaštititi vrste i osigurati održivu proizvodnju unatoč klimatskim promjenama.

## Literatura

- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (eds.). (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627*. Rome, FAO, 628.
- Clinical Guide to Fish Medicine. (2021). In *Wiley eBooks*. <https://doi.org/10.1002/9781119259886>
- Elston, R. A. (1990). *Mollusc Diseases: Guide for the Shellfish Farmer*. Washington Sea Grant Program, University of Washington Press, Seattle.
- Ergün, D. et al. (2020). *Handbook on European Fish Farming*. Tudás Alapítvány, 326.
- Jeney, G. (2017). *Fish diseases: Prevention and Control Strategies*. Academic Press.
- Fish viruses and bacteria: pathobiology and protection. (2017). In *CABI eBooks*. <https://doi.org/10.1079/9781780647784.0000>
- Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627*. Rome, FAO, 628.
- Lal, J., Vaishnav, A., Singh, S. K., Meena, D. K., Biswas, P., Mehta, N. K., & Priyadarshini, M. B. (2024). Biotechnological innovation in fish breeding: from marker assisted selection to genetic modification. *Deleted Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44340-024-00007-6>.
- Lucas, J. S., Southgate, P. C., & Tucker, C. S. (2019). *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants*. John Wiley & Sons.
- Noga, E. J. (2010). *Fish disease: diagnosis and treatment*. John Wiley & Sons.
- Parker, R. (2011). *Aquaculture Science*. Delmar.
- Timmons, M. B., & Center, N. R. A. (2013). *Recirculating Aquaculture*.
- Tucker, C. S., & Hargreaves, J. A. (eds.). (2009). *Environmental best management practices for aquaculture*. John Wiley & Sons.
- Yue, K., & Shen, Y. (2021). An overview of disruptive technologies for aquaculture. *Aquaculture and Fisheries*, 7(2), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.009>
- Woo, P. T., & Iwama, G. K. (eds.). (2019). *Climate change and non-infectious fish disorders*. CABI.

## Poglavlje 6. Odabir sustava za akvakulturu pod globalnim zatopljenjem

izv. prof. dr. sc. Dimitris Klaoudatos  
Sveučilište u Tesaliji (UTH)

### Uvod

Globalno zatopljenje značajno utječe na vodene ekosustave i akvakulturu, što zahtijeva usvajanje otpornih sustava za rješavanje izazova kao što su porast temperature, iscrpljivanje kisika i povećana prevalencija bolesti. Održive prakse akvakulture ključne su za ublažavanje tih učinaka, a odabir sustava igra ključnu ulogu u osiguravanju prilagodljivosti i dugoročne održivosti. Ovo poglavlje pruža sveobuhvatno ispitivanje učinaka klimatskih promjena na sustave akvakulture, istražujući inovativna rješenja i strategije za usmjeravanje kreatora politika, istraživača i dionika u industriji u poticanju održivosti u sektoru. Istraživanja naglašavaju važnost uključivanja tehnologija otpornih na klimatske promjene, kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi(RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA), kako bi se povećala produktivnost i smanjio ekološki otisak (Boyd i sur., 2022; Handisyde i sur., 2017; Froehlich i sur., 2018).

Akvakultura je jedan od najbrže rastućih sektora proizvodnje hrane na svijetu i igra ključnu ulogu u zadovoljavanju prehrambenih potreba rastuće ljudske populacije. Međutim, utjecaji globalnog zatopljenja uveli su značajne izazove za njegovu održivost. Porast globalnih temperatura, zakiseljavanje oceana, promjene u salinitetu i širenje patogena preoblikuju vodene ekosustave i predstavljaju nove izazove za operacije u akvakulturi. Ove promjene u okolišu ugrožavaju ne samo ekonomsku održivost industrije akvakulture, već i globalnu sigurnost hrane i biološku raznolikost.

Klimatske promjene pogoršavaju toplinski stres u vodenom okolišu, utječući na brzinu metabolizma, rast i razmnožavanje uzgojenih vrsta. Prema Boydu i McNevinu (2015), temperaturne fluktuacije izvan optimalnog raspona za vrste u akvakulturi mogu dovesti do povećane potražnje za kisikom, smanjenih imunoloških odgovora i veće stope smrtnosti. Osim toga, zagrijavanje voda stvara povoljne uvjete za štetno cvjetanje algi (HAB), koje može iscrpiti razinu kisika i osloboditi toksine štetne za vodeni život (Diaz i Rosenberg, 2008). Ovi fenomeni zahtijevaju inovativne pristupe dizajnu i upravljanju sustavima akvakulture.

Zakiseljavanje oceana, izravna posljedica povećanih razina ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u atmosferi, predstavlja još jedan kritičan izazov. Zakiseljene vode smanjuju dostupnost karbonatnih iona potrebnih školjkašima i drugim kalcificirajućim organizmima da izgrade svoje školjke i kosture. Cooley i sur. (2009) ističu ekonomske i ekološke rizike povezane sa zakiseljavanjem, posebno za industriju školjkaša. Osim toga, promjene u salinitetu uzrokovane otapanjem ledenih kapa i

promijenjenim obrascima oborina narušavaju geografsku rasprostranjenost vrsta akvakulture, što zahtijeva operacije prilagodbe tim dinamičkim uvjetima (Troell i sur., 2003).

Sve je veća zabrinutost zbog proliferacije bolesti u sustavima akvakulture pod utjecajem klimatskih promjena. Više temperature ubrzavaju životne cikluse mnogih patogena i parazita, povećavajući učestalost i ozbiljnost izbijanja. Na primjer, *Vibrio* spp., uobičajeni patogen u akvakulturi, uspijeva na povišenim temperaturama, što dovodi do značajnih ekonomskih gubitaka (Bondad-Reantaso i sur., 2005). Ovi izazovi naglašavaju važnost usvajanja sustava akvakulture otpornih na klimatske promjene koji mogu ublažiti štetne učinke globalnog zatopljenja.

Odabir sustava ključan je korak u prilagodbi tim izazovima. Zatvoreni recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS), integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) i offshore sustavi akvakulture inovativni su pristupi koji mogu povećati otpornost i održivost. Prema Martinsu i sur. (2010), RAS pruža preciznu kontrolu okoliša, smanjujući vanjske stresore na vodene vrste. IMTA, integrira vrste s komplementarnim ekološkim ulogama, poboljšavajući kruženje hranjivih tvari i zdravlje ekosustava. Offshore akvakultura, koja djeluje u dubljim vodama sa stabilnim okolišnim uvjetima, nudi održivu alternativu obalnim sustavima osjetljivima na klimatski izazvanu eutrofikaciju i hipoksiju (Holmer, 2010.; Pereira i sur., 2024).

## 1. Klimatski izazovi za sustave akvakulture

Globalno zatopljenje uvelo je značajne izazove u sustave akvakulture, uključujući porast temperature vode, zakiseljavanje oceana i promijenjene razine saliniteta, što ugrožava zdravlje i produktivnost vodenih organizama. Povećani toplinski stres ubrzava metabolizam, dok eutrofikacija i hipoksija prijete vodenim staništima. Nadalje, klimatske promjene potiču širenje bolesti i patogena, posebno kod vrsta s uskom tolerancijom na okolišne uvjete (Boyd i McNevin, 2015.; Diaz i Rosenberg, 2008). Razumijevanje ovih utjecaja ključno je za razvoj adaptivnih strategija koje osiguravaju otpornost akvakulture.

### 1.1. Toplinski stres

Porast globalne temperature predstavlja znatan izazov za sustave akvakulture, posebno za vrste s uskim toplinskim tolerancijama. Na primjer, studije pokazuju da porast temperature vode dovodi do veće stope metabolizma kod riba, povećavajući potražnju za kisikom i stres (Boyd i McNevin, 2015). Rastuće globalne temperature predstavljaju značajne izazove za operacije akvakulture, posebno za vrste s uskim toplinskim tolerancijama. Ribe, školjkaši i drugi vodeni organizmi često imaju ograničen raspon optimalnih temperatura potrebnih za njihove fiziološke funkcije. Povišene temperature povećavaju metabolizam, što dovodi do povećane potražnje za kisikom i fiziološkog stresa (Boyd i McNevin, 2015). S porastom temperature vode, dostupnost kisika smanjuje se zbog smanjene topljivosti, stvarajući uvjete hipoksije izazvane temperaturom. Ovaj fenomen pogoršava stope smrtnosti kod vrsta kao što su losos i tilapija, posebno u slojevitim vodenim tijelima gdje razine kisika već variraju.

## 1.2. Eutrofikacija i proliferacija bolesti

Eutrofikacija izazvana klimatskim promjenama ubrzava opterećenje hranjivim tvarima u vodenim ekosustavima povećanjem otjecanja hranjivih tvari iz poljoprivrednih aktivnosti i pojačavanjem oborina. Višak hranjivih tvari, osobito dušika i fosfora, dovodi do štetnog cvjetanja algi (HAB), koje tijekom razgradnje oslobađaju toksine i iscrpljuju otopljeni kisik. Eutrofikacija je vodeći uzrok hipoksičnih zona, koje se često nazivaju "mrtve zone", zbog kojih su vodena staništa nenastanjiva. Na primjer, hipoksična zona Meksičkog zaljeva, potaknuta unosom hranjivih tvari iz rijeke Mississippi, proširila se zbog antropogenih i klimatskih pokretača, utječući na riblje zalihe i operacije akvakulture.

Toplije vode stvaraju uvjete povoljne za patogene i parazite, povećavajući rizike u sustavima akvakulture. Na primjer, *Vibrio* spp. uspijeva na povišenim temperaturama, uzrokujući ekonomske gubitke u uzgoju kozica i ribe (Bondad-Reantaso i sur., 2005; Pounds et al., 2006). Nadalje, više temperature slabe imunološki sustav vodenih organizama, čineći ih osjetljivijima na infekcije. Na primjer, najezde morskih ušiju na uzgajalištima lososa pogoršale su se posljednjih godina, što je rezultiralo značajnim gospodarskim gubicima i povećanim oslanjanjem na kemijske tretmane, koji nose rizike za okoliš (Abolofia i sur., 2017).

## 1.3. Zakiseljavanje oceana i promjene saliniteta

Zakiseljavanje oceana još je jedno kritično pitanje koje utječe na akvakulturu, posebno uzgoj školjaka. Kako se atmosferski CO<sub>2</sub> otapa u oceanima, stvara ugljičnu kiselinu, koja snižava razinu pH i smanjuje dostupnost karbonatnih iona neophodnih za stvaranje ljuske i kostura u kalcificirajućim organizmima (Cooley i sur., 2009). Mekušci, poput kamenica i vongola, posebno su ranjivi, a zakiseljene vode dovode do tanjih ljuski i niže stope preživljavanja. Osim toga, zakiseljavanje remeti osjetilne funkcije kod nekih vrsta riba, mijenjajući njihovo ponašanje pri izbjegavanju grabežljivaca i dinamiku ekosustava (Munday i sur., 2009).

Otapanje ledenih kapa i promjena obrasca oborina mijenjaju razinu saliniteta u morskom i estuarskom okolišu, što zauzvrat utječe na distribuciju i produktivnost vrsta akvakulture. Vrste poput kozica i lubina, koje su osjetljive na fluktuacije saliniteta, mogu doživjeti smanjen rast i razmnožavanje (Troell i sur., 2003). U Bangladešu su rastuće razine saliniteta u obalnim vodama prisilile uzgajivače kozica da se prilagode uvođenjem vrsta otpornih na sol; Međutim, ove promjene dolaze sa značajnim ekonomskim i ekološkim troškovima.

## 2. Ključni kriteriji za odabir sustava

Odabir sustava akvakulture koji mogu izdržati negativne učinke klimatskih promjena ključan je za održivost. Ključni kriteriji uključuju otpornost na temperaturne fluktuacije, ublažavanje eutrofikacije, kontrolu patogena, energetske učinkovitost i prilagodljivost promjenama saliniteta. Sustavi kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) učinkovito rješavaju ove izazove osiguravanjem kontrole okoliša i kruženja hranjivih tvari (Martins i sur., 2010; Pereira i sur., 2024). Tim se kriterijima osigurava prilagodljivost sustava akvakulture klimatskim uvjetima koji se mijenjaju.

## 2.1. Otpornost na promjene u okolišu

Zatvoreni recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) nude preciznu kontrolu temperature, poboljšavajući prilagodljivost sustava toplinskom naprezanju. Sustavi moraju biti prilagodljivi temperaturnim promjenama kako bi se smanjio toplinski stres vodenih organizama. Zatvoreni recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) posebno su učinkoviti jer nude preciznu kontrolu temperature vode i drugih parametara okoliša. RAS pruža značajne prednosti u održavanju optimalnih uvjeta za rast i opstanak vrsta (Martins i sur., 2010). Primjer je akvakultura lososa u Norveškoj koja koristi RAS tehnologiju za ublažavanje utjecaja porasta temperature mora (Badiola i sur., 2012).

### *Ublažavanje eutrofikacije*

Integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) uključuje hranilice za filtriranje i morske alge kako bi se smanjilo opterećenje hranjivim tvarima, apsorbirao višak hranjivih tvari, poboljšao ukupnu kvalitetu vode i ublažila eutrofikacija (Pereira i sur., 2024). Integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) održivo je rješenje za upravljanje hranjivim tvarima. IMTA integrira vrste kao što su ribe, morske alge i školjkaši kako bi reciklirala hranjive tvari i smanjila rizik od eutrofikacije. Farme morskih algi u Aziji pokazale su praktično kruženje hranjivih tvari, smanjujući HAB-ove i poboljšavajući kvalitetu vode (Troell i sur., 2003).

### *Kontrola patogena*

Klimatske promjene povećale su rizike od patogena i bolesti u akvakulturi, jer više temperature vode ubrzavaju životne cikluse štetnih organizama, uključujući bakterije, viruse i parazite. Napredne strategije kontrole patogena ključne su za zaštitu operacija akvakulture od ovih rizika. Biosigurni sustavi, kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS), igraju ključnu ulogu izoliranjem uzgojenih vrsta iz vanjskog okruženja, značajno smanjujući izloženost patogenima. Tehnologije poput ultraljubičaste (UV) sterilizacije, obrade ozonom i biofiltera učinkovito smanjuju mikrobno opterećenje u vodenim sustavima, čime se štite vodene vrste (Bondad-Reantaso i sur., 2005). Na primjer, farme kozica u jugoistočnoj Aziji uspješno su koristile RAS u kombinaciji s UV sterilizacijom za borbu protiv izbijanja *Vibria*, koje su često potaknute porastom temperature mora (Aly i Fathi, 2024). Prakse akvakulture otporne na patogene, kao što je selektivni uzgoj radi tolerancije na bolesti, dodatno povećavaju otpornost ranjivih vrsta.

## 2.2. Energetska učinkovitost i ugljični otisak

Energetski učinkoviti sustavi igraju ključnu ulogu u smanjenju ugljičnog otiska operacija akvakulture. Integracija obnovljivih izvora energije, kao što su solarna energija i energija vjetra, te usvajanje učinkovitih tehnologija, kao što su napredni sustavi za prozračivanje, ključni su za održivi razvoj u tom sektoru. Recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS), iako energetski intenzivni zbog crpljenja vode, prozračivanja i regulacije temperature, predstavljaju održiv put do održivosti kada se napajaju obnovljivim izvorima energije. Na primjer, pokazalo se da hibridne RAS postavke na solarni pogon smanjuju operativne troškove energije za 30% uz održavanje produktivnosti (Manolache i Andrei, 2024).

Inovativna energetska rješenja, kao što su sustavi za proizvodnju energije iz otpada koji pretvaraju organski otpad iz akvakulture u bioplin, dodatno poboljšavaju održivost rješavanjem izazova

gospodarenja otpadom (Martins i sur., 2010). Sustavi akvakulture na solarni pogon u regijama s ograničenim resursima, kao što je subsaharska Afrika, pokazuju kako energetska učinkovita rješenja mogu potaknuti ekološku i gospodarsku održivost. Korištenjem obnovljive energije i učinkovitih tehnologija prozračivanja, industrija akvakulture može značajno smanjiti svoj utjecaj na okoliš uz promicanje dugoročne otpornosti i produktivnosti (Badiola i sur., 2012).

### ***Prilagodljivost fluktuacijama saliniteta***

Sustavi smješteni u obalnim i estuarskim regijama moraju uzeti u obzir promjene u salinitetu potaknute globalnim zatopljenjem. Eurihaline vrste, sposobne tolerirati širok raspon saliniteta, mogu biti prioritet. Selektivni programi uzgoja često se koriste za razvoj vrsta s povećanom tolerancijom na salinitet (Rahman i sur., 2021). Primjer je prilagodba operacija akvakulture u Bangladešu na prodore saliniteta uzgojem vrsta otpornih na sol, poput tilapije.

Prilagodljivost fluktuacijama saliniteta ključan je čimbenik za sustave akvakulture, posebno u obalnim i estuarskim regijama gdje klimatske promjene uzrokuju značajne promjene u obrascima saliniteta. Otapanje polarnih ledenih kapa, promijenjeni obrasci oborina i porast razine mora doprinose nepredvidivim varijacijama saliniteta, koje utječu na vrste osjetljive na te promjene. Sustavi moraju dati prednost odabiru vrsta i tehnološkim rješenjima kako bi se održala produktivnost u takvim uvjetima. Eurihaline vrste, koje podnose širok raspon razina saliniteta, obično su favorizirane u tim okruženjima. Na primjer, tilapija i lubin pokazuju snažnu otpornost na fluktuacije saliniteta, što ih čini idealnim kandidatima za akvakulturu u promjenjivim okruženjima (Tine i sur., 2014; Rahman i sur., 2021).

Tehnološke intervencije, kao što su selektivni uzgojni programi, unaprijedile su razvoj sojeva s povećanom tolerancijom na salinitet. Istraživanje tilapije pokazalo je potencijal za uzgoj varijanti otpornih na sol koje mogu uspijevati u okruženjima zahvaćenim upadom saliniteta (Yue i sur., 2024). Nadalje, zatvoreni sustavi kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) nude kontrolirana okruženja u kojima se razine saliniteta mogu prilagoditi kako bi zadovoljile zahtjeve specifične za vrstu, smanjujući stres i povećavajući stope rasta. Inovacije u tehnologijama filtriranja vode i desalinizacije također omogućuju operaterima da učinkovito ublaže utjecaje fluktuacija saliniteta (Martins i sur., 2010).

Primjeri adaptivnih praksi akvakulture uključuju operacije u Bangladešu koje su se prebacile na vrste otporne na sol kao odgovor na povećanje obalnog saliniteta. Te su prakse smanjile gospodarske gubitke i ojačale sigurnost opskrbe hranom u ranjivim regijama (Troell i sur., 2023). Davanjem prednosti prilagodljivosti sustavi akvakulture mogu se bolje oduprijeti dinamičnim izazovima globalnog zatopljenja, osiguravajući održivu proizvodnju i otpornost.

### ***Ekonomska održivost i skalabilnost***

Ekonomska održivost i skalabilnost naprednih sustava akvakulture ključne su za osiguravanje širokog usvajanja. Iako sustavi poput RAS-a i IMTA-e nude dugoročne prednosti, njihovi visoki početni troškovi mogu odvratiti male i srednje uzgajivače. Mehanizmi podjele troškova, kao što su javno-privatna partnerstva i državne subvencije, mogu riješiti financijske prepreke. Osim toga, ekonomski

razmjeri postignuti većim operacijama ili zadružnim modelima mogu smanjiti troškove po jedinici. Studije pokazuju da je skaliranje IMTA sustava u Kanadi povećalo učinkovitost proizvodnje za 25%, a istovremeno značajno poboljšalo ekološke ishode (Baltadakis, 2021). Inovacije u modularnim sustavima akvakulture, koje omogućuju postupno širenje, pružaju fleksibilna i isplativa rješenja za nove sudionike u industriji.

### 3. Inovativni sustavi za rješavanje klimatskih izazova

Inovativni sustavi akvakulture, kao što su akvakultura na moru, RAS i IMTA, predstavljaju održiva rješenja za borbu protiv izazova izazvanih klimatskim promjenama. Akvakultura na moru smanjuje rizike od eutrofikacije i hipoksije radeći u stabilnim dubokovodnim okruženjima, dok RAS pruža preciznu kontrolu okoliša, smanjujući vanjske utjecaje. IMTA povećava ekološku otpornost integracijom komplementarnih vrsta, poboljšanjem recikliranja hranjivih tvari i kvalitete vode (Holmer, 2010; Pereira i sur., 2024). Ove tehnologije pokazuju potencijal za održive prakse akvakulture koje su u skladu s ekološkim i ekonomskim ciljevima.

#### *Akvakultura na moru*

Offshore akvakultura pokazala se obećavajućim rješenjem za izazove uzrokovane klimatskim promjenama u obalnim i priobalnim sustavima. Radeći u dubljim vodama, ovi sustavi imaju koristi od stabilnih temperaturnih profila, viših razina kisika i smanjenog nakupljanja hranjivih tvari, ublažavajući rizike povezane s eutrofikacijom i hipoksijom (Holmer, 2010). Kavezi na moru, poput onih koji se koriste za oradu (*Sparus aurata*) i brancina (*Dicentrarchus labrax*) u Sredozemlju, pokazuju potencijal ovih sustava za širenje proizvodnje akvakulture uz minimiziranje utjecaja na okoliš (Nielsen i sur., 2021.). Međutim, offshore sustavi zahtijevaju znatna ulaganja u robusnu infrastrukturu kako bi izdržali jake struje i djelovanje valova, kao i napredne tehnologije praćenja kako bi se osigurala operativna učinkovitost.

#### *Recirkulacijski akvakulturni sustavi(RAS)*

RAS smanjuje potrošnju vode i omogućuje preciznu kontrolu okoliša, smanjujući utjecaje vanjskih klimatskih fluktuacija (Martins i sur., 2010). Recirkulacijski akvakulturni sustavi(RAS) predstavljaju vrhunski pristup rješavanju ograničenja okoliša i resursa. Ovi zatvoreni sustavi recikliraju vodu u kontroliranim okruženjima, značajno smanjujući potrošnju vode i ograničavajući utjecaj vanjskih fluktuacija okoliša (Badiola i sur., 2012). RAS omogućuje preciznu kontrolu temperature, razine kisika i gospodarenja otpadom, što ga čini prikladnim za vrste osjetljive na promjene u okolišu. Na primjer, uzgoj lososa u Norveškoj sve se više oslanja na RAS kako bi ublažio učinke zagrijavanja obalnih voda. Međutim, visoke energetske potrebe i operativni troškovi RAS-a zahtijevaju kontinuirane inovacije kako bi se poboljšala energetska učinkovitost i ekonomska održivost (Martins i sur., 2010).

#### *Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA)*

IMTA povećava ekološku otpornost integracijom vrsta s komplementarnim funkcijama, kao što su ribe, školjkaši i morske alge (Pereira i sur., 2024). Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA) inovativan je sustav koji uključuje više vrsta s različitih trofičkih razina u jednu poljoprivrednu operaciju. Ovaj sustav koristi prirodne ekološke odnose među vrstama kako bi poboljšao kruženje

hranjivih tvari i smanjio utjecaj na okoliš. Na primjer, morske alge i školjkaši mogu apsorbirati višak hranjivih tvari nastalih proizvodnjom riba, ublažavajući eutrofikaciju i poboljšavajući kvalitetu vode (Pereira i sur., 2024). U Kanadi su IMTA sustavi koji uključuju atlantskog lososa (*Salmo salar*), dagnje (*Mytilus edulis*) i alge (*Saccharina latissima*) pokazali ekološke i ekonomske koristi, uključujući povećanu proizvodnju biomase i smanjeno opterećenje hranjivim tvarima u okolnim vodama (Troell i sur., 2003).

### **Akvakultura morskih algi**

Uzgoj morskih algi dobiva priznanje kao sustav akvakulture otporan na klimatske promjene sa značajnim prednostima za okoliš. Morske alge apsorbiraju ugljični dioksid i hranjive tvari iz vode, suprotstavljajući se zakiseljavanju oceana i eutrofikaciji. Osim toga, uzgoj morskih algi predložen je kao strategija sekvestracije ugljika za ublažavanje utjecaja klimatskih promjena (Froehlich i sur., 2019). U Aziji velike farme morskih algi značajno doprinose lokalnim gospodarstvima uz poboljšanje zdravlja morskog ekosustava. Tehnologije u nastajanju, kao što su offshore platforme za uzgoj morskih algi, dodatno proširuju potencijal za održivu proizvodnju morskih algi u regijama s ograničenim obalnim prostorom (Visch i sur., 2023).

### **4.5 Pametne tehnologije akvakulture**

Integracija digitalnih tehnologija, kao što su umjetna inteligencija, internet i daljinsko istraživanje, revolucionirala je operacije akvakulture. Pametni sustavi omogućuju praćenje okolišnih parametara u stvarnom vremenu, uključujući temperaturu, salinitet i otopljeni kisik, omogućujući uzgajivačima da proaktivno reagiraju na promjenjive uvjete (Føre i sur., 2018). Na primjer, automatizirani sustavi hranjenja i zdravstvena dijagnostika vođena umjetnom inteligencijom povećavaju operativnu učinkovitost uz smanjenje otpada. Ove inovacije podupiru održivost i skalabilnost sustava akvakulture suočenih s pritiscima klimatskih promjena.

## **4. Politika i ekonomska razmatranja**

Za donošenje sustava akvakulture otpornih na klimatske promjene potrebna je sveobuhvatna potpora politike i gospodarski okviri. Regulatorni poticaji, kao što su subvencije i bespovratna sredstva, mogu nadoknaditi visoke početne troškove, dok međunarodna suradnja i tržišna potražnja za održivim proizvodima potiču transformaciju industrije. Programi certificiranja i ekološke oznake pružaju ekonomske poticaje za ekološki odgovorne prakse. Osim toga, mehanizmi osiguranja prilagođeni klimatskim rizicima osiguravaju kontinuitet poslovanja za ranjive dionike (FAO, 2020; Bush i sur., 2013). Ta su razmatranja ključna za usklađivanje praksi akvakulture s globalnim ciljevima održivosti.

### **Regulatorna podrška**

Vlade imaju ključnu ulogu u poticanju sustava akvakulture otpornih na klimatske promjene. Politike bi trebale dati prednost poticajima za usvajanje održivih tehnologija kao što su recirkulacijski sustavi akvakulture (RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA). Na primjer, zajedničkom ribarstvenom politikom Europske unije (ZRP) promiče se održiva akvakultura integracijom strategija prilagodbe klimatskim promjenama (FAO, 2020). Subvencije, porezne olakšice i bespovratna sredstva mogu dodatno potaknuti ulaganja u inovativne sustave. Osim toga, regulatorni okviri moraju

se baviti pitanjima kao što su učinkovitost korištenja vode, gospodarenje otpadom i kontrola bolesti kako bi se prakse akvakulture uskladile s ciljevima ekološke održivosti (OECD, 2021).

### ***Ekonomska izvedivost***

Visoki početni troškovi naprednih sustava, kao što su RAS i IMTA, moraju se nadoknaditi dugoročnim koristima, uključujući smanjene gubitke od utjecaja povezanih s klimom (Tett i sur., 2011). Prijelaz na napredne sustave akvakulture često podrazumijeva visoke početne troškove, što može spriječiti široko prihvaćanje, posebno u regijama s niskim i srednjim dohotkom. Analiza troškova i koristi ključna je za dokazivanje dugoročnih gospodarskih prednosti sustava otpornih na klimatske promjene, uključujući smanjene gubitke zbog poremećaja povezanih s okolišem i bolestima. Na primjer, RAS smanjuje ovisnost o vanjskim izvorima vode i minimizira rizike za okoliš, što dovodi do nižih operativnih troškova tijekom vremena (Badiola i sur., 2012). Javno-privatna partnerstva i programi financijske pomoći mogu premostiti nedostatke u financiranju, osiguravajući širu dostupnost tim tehnologijama (Svjetska banka, 2013).

#### **4.1. Međunarodna suradnja i svijest potrošača**

Utjecaji klimatskih promjena nadilaze nacionalne granice, što zahtijeva međunarodnu suradnju. Suradničke istraživačke inicijative, kao što su one u okviru programa Obzor Europa, usmjerene su na razvoj tehnologija akvakulture otpornih na klimatske promjene i razmjenu najboljih praksi među dionicima (Europska služba za vanjsko djelovanje, 2021). Štoviše, međunarodne organizacije poput Organizacije za hranu i poljoprivredu (FAO) pružaju tehničku podršku i preporuke politike za jačanje globalne otpornosti akvakulture (FAO, 2024). Regionalni savezi, kao što je Azijsko-pacifička komisija za ribarstvo (APFIC), također olakšavaju prijenos znanja i udruživanje resursa, omogućujući zemljama da usvoje prilagođena rješenja za svoje jedinstvene izazove (APFIC, 2019). Globalna partnerstva mogu olakšati razmjenu znanja i financiranje istraživanja praksi akvakulture otpornih na klimatske promjene (Tett i sur., 2011).

### ***Dinamika tržišta***

Tržišne sile igraju ključnu ulogu u poticanju usvajanja održivih praksi akvakulture. Rastuća potražnja potrošača za ekološki prihvatljivim morskim plodovima stvorila je ekonomske poticaje za proizvođače da implementiraju održive sustave. Sheme certificiranja, poput onih koje nudi Vijeće za upravljanje akvakulturom (ASC), pružaju tržišne prednosti jačanjem konkurentnosti i pružanjem transparentnosti potrošačima, potičući pomake prema održivosti u cijeloj industriji (Bush i sur., 2013). Ovi certifikati, u kombinaciji s obrazovnim kampanjama koje ističu ekološke prednosti klimatski prilagodljivih praksi kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA), značajno utječu na ponašanje pri kupnji, potičući pomak na tržištu prema ekološki prihvatljivim morskim proizvodima (Potts i sur., 2021). Osim toga, digitalne tehnologije, uključujući lanac blokova, transformiraju lanac opskrbe morskim proizvodima omogućujući sljedivost, potičući povjerenje i osiguravajući odgovornost među potrošačima i proizvođačima (Probst, 2020). Integracijom shema certificiranja, obrazovnih napora i tehnološkog napretka, industrija akvakulture postupno se usklađuje s ciljevima održivosti, osiguravajući i ekološku i ekonomsku korist.

### *Mehanizmi za ublažavanje rizika i osiguranje*

Budući da su rizici povezani s klimom, kao što su ekstremni vremenski uvjeti i izbijanje bolesti, povećanje učestalosti i intenziteta, snažne strategije za smanjenje rizika i prilagođeni mehanizmi osiguranja ključni za zaštitu operacija akvakulture. Proizvodi osiguranja posebno osmišljeni za akvakulturu, kao što su osiguranje usjeva za vrste akvakulture ili parametarsko osiguranje za štetu uzrokovanu vremenskim neprilikama, mogu pružiti financijsku sigurnost subjektima. Suradnja između vlada, financijskih institucija i pružatelja osiguranja neophodna je za razvoj pristupačnih i dostupnih shema osiguranja. Na primjer, parametarski programi osiguranja na Filipinima uspješno su osigurali isplate uzgajivačima ribe pogođenim tajfunima, omogućujući brz oporavak i kontinuitet poslovanja (Van Anrooy i sur., 2022). Alati za procjenu rizika, kao što su klimatsko modeliranje i sustavi ranog upozoravanja, dodatno povećavaju otpornost pomažući operaterima da predvide i ublaže potencijalne poremećaje (Allison i sur., 2009).

### **Sažetak**

Učinci globalnog zatopljenja na akvakulturu naglašavaju potrebu za strateškim odabirom sustava i održivim praksama kako bi se osigurala dugoročna otpornost i produktivnost industrije. Kako se izazovi izazvani klimatskim promjenama kao što su porast temperature, zakiseljavanje oceana i širenje bolesti nastavljaju intenzivirati, usvajanje inovativnih i prilagodljivih sustava akvakulture postaje imperativ. Ovo poglavlje ističe kritične pristupe, uključujući reciklacijske sustave akvakulture (RAS), integriranu multitrofičku akvakulturu (IMTA) i akvakulturu na moru, kao održiva rješenja za ublažavanje ovih izazova.

Reciklacijski sustavi akvakulture (RAS) pružaju preciznu kontrolu okoliša, omogućujući operacijama da izdrže vanjske klimatske fluktuacije uz smanjenje ovisnosti o vanjskim izvorima vode. Integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) promiče recikliranje hranjivih tvari i stabilnost ekosustava, nudeći holistički pristup održivosti. Akvakultura na moru, koja djeluje u dubljim i stabilnijim vodama, minimizira utjecaje obalne eutrofikacije i hipoksije, pružajući učinkovitu alternativu za širenje proizvodnje.

Za prelazak na te sustave potrebni su sveobuhvatni okviri politike i financijski poticaji kako bi se prevladale prepreke povezane s visokim početnim troškovima. Vlade, privatni dionici i međunarodne organizacije moraju surađivati putem mehanizama kao što su međunarodni sporazumi, programi financiranja i platforme za razmjenu znanja. Posebne mjere, uključujući subvencije, porezne olakšice i bespovratna sredstva, biti će ključne za poticanje ulaganja u tehnologije otporne na klimatske promjene, posebno za male uzgajivače koji su najosjetljiviji na klimatske šokove.

Svijest potrošača i tržišna potražnja za ekološki održivim morskim proizvodima stvaraju dodatne mogućnosti za transformaciju industrije. Programi certificiranja i ekološke oznake mogu potaknuti proizvođače da usvoje prakse otporne na klimatske promjene, istodobno potičući povjerenje i transparentnost među potrošačima. Obrazovne kampanje i globalno širenje tih inicijativa mogu dodatno povećati njihov učinak, posebno u regijama s velikim potencijalom akvakulture. Iskorištavanje tehnologija kao što je lanac blokova za sljedivost lanca opskrbe također će imati ključnu ulogu u jačanju povjerenja potrošača.

Ulaganja u istraživanje i razvoj ključna su za inovacije i usavršavanje sustava akvakulture. Prioritetna područja uključuju poboljšanje energetske učinkovitosti u RAS-u, razvoj jeftinih IMTA sustava i unapređenje strategija kontrole patogena. Dugoročnim praćenjem okoliša i proaktivnim strategijama upravljanja osigurat će se prilagodljivost klimatskim okolnostima koje se mijenjaju.

Integracijom tehnološkog napretka i ekoloških načela sektor akvakulture može povećati otpornost i održivost. Kreatori politika, istraživači i dionici u industriji moraju djelovati odlučno kako bi implementirali sustave koji osiguravaju dugoročnu održivost sektora usred klimatskih promjena. Zajedničkim naporima akvakultura može nastaviti napredovati, pridonoseći globalnoj sigurnosti opskrbe hranom i gospodarskom razvoju u doba klimatskih promjena.

## Literatura

- 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., Adger, W. N., 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, Thailand.
- 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 scales.
- World Bank. (2013). *Fish to 2030: Prospects for fisheries and aquaculture* (Report No. 83177-GLB). World Bank.
- 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](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*. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action*. <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.
- 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. <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 No. 589).
- 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., Karmakar, K. G., Lengyel, P., ... & Zhang, Z. (2022). *World review of capture fisheries and aquaculture insurance 2022* (Vol. 682). Food and Agriculture Organization.



Funded by  
the European Union



**The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future – Curriculum Innovations in Aquaculture [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.

## Rječnik

**Aerobni proces** – kemijski ili biološki procesi koji se događaju u prisutnosti kisika.

**Akvakultura** – uzgoj i izlov ribe, rakova, mekušaca i vodenog bilja u kontroliranim uvjetima. To je u osnovi poljoprivreda u vodi, za hranu, očuvanje ili druge komercijalne i ekološke svrhe.

**Akvakultura morskih algi** – uzgoj morskih algi za apsorpciju CO<sub>2</sub>, uklanjanje hranjivih tvari i održivu proizvodnju hrane.

**Anaerobni uvjeti** – okruženja s vrlo malo ili nimalo kisika, poput dna ribnjaka ili močvara. U takvim se uvjetima organska tvar razgrađuje bez kisika, često oslobađajući plinove poput metana.

**Biofilter** – sustav filtracije koji koristi žive organizme (npr. bakterije) za razgradnju otpada u sustavima akvakulture.

**Biološka raznolikost** – raznolikost biljaka, životinja i mikroorganizama na određenom području ili ekosustavu. Neophodan je za zdravo funkcioniranje ekosustava, jer svaka vrsta doprinosi ekološkoj ravnoteži.

**Biosigurnost** – mjere poduzete za sprečavanje unošenja i širenja štetnih organizama, kao što su patogeni, u sustave akvakulture.

**Bruto energija** – ukupna energija sadržana u hrani.

**Brzina metabolizma** – brzina kojom organizam koristi energiju za održavanje fizioloških funkcija; kod riba se povećava s temperaturom i potrebom za kisikom.

**Ciklus hranjivih tvari** – kretanje hranjivih tvari kroz ekosustav; IMTA sustavi često poboljšavaju ovaj ciklus.

**Cjepivo** – biološki pripravak dizajniran za izgradnju ili jačanje imuniteta protiv određenih bolesti.

**CRISPR–Cas9** – revolucionarni alat za uređivanje gena koji omogućuje preciznu modifikaciju sekvenci DNK kako bi se poboljšale osobine u vrstama akvakulture, kao što su otpornost na bolesti ili stopa rasta.

**Denitrifikacija** – anaerobni proces u kojem kemotrofne bakterije pretvaraju nitrate (NO<sub>3</sub>) u plin dušik (N<sub>2</sub>), dušikov oksid (N<sub>2</sub>O) ili amonijak (NH<sub>3</sub>).

**Diferencijalna dijagnoza** – razlikovanje više mogućih bolesti kako bi se utvrdio stvarni uzrok.

**Dijagnoza** – utvrđivanje prirode bolesti; dijagnostičko – povezano s dijagnozom.

**Dobrobit životinja** – etičko razmatranje životnih uvjeta, zdravlja i prirodnog ponašanja riba iz uzgoja i vodenih životinja u sustavima akvakulture.

**Emisije ugljičnog dioksida** – ispuštanje CO<sub>2</sub> i drugih stakleničkih plinova u atmosferu, prvenstveno izgaranjem fosilnih goriva.

**Eurihaline vrste** – organizmi koji mogu podnijeti širok raspon saliniteta i prilagoditi se promjenjivom okruženju.

**Eutrofikacija** – proces u kojem prekomjerne hranjive tvari, posebno dušik i fosfor, ulaze u vodena tijela, pokrećući cvjetanje algi, smanjujući bistrinu vode i iscrpljivanje kisika, šteteći vodenim organizmima i stabilnosti ekosustava.

**Fenotipska plastičnost** – sposobnost organizma da se prilagodi promjenama u okolišu promjenom svoje fiziologije, morfologije ili ponašanja (npr. kao odgovor na temperaturu ili salinitet).

**Fluktuacije saliniteta** – promjene koncentracije soli u vodenim tijelima zbog oborina, otapanja ledenjaka ili ljudske aktivnosti, koje utječu na opstanak vodenih organizama.

**Globalno zatopljenje** – porast prosječne površinske temperature Zemlje zbog povećanja koncentracije stakleničkih plinova, što dovodi do porasta razine mora, ekstremnih vremenskih uvjeta i promjena ekosustava.

**Hipoksija** – stanje niske razine otopljenog kisika u vodi, nedovoljno za preživljavanje većine vodenih organizama. Često uzrokovano eutrofikacijom ili visokom temperaturom i toplinskom slojevitošću.

**Hranilice za filtriranje** – vodeni organizmi, kao što su rakovi, koji se hrane filtriranjem sitnih čestica iz vode i pomažu u poboljšanju kvalitete vode.

**Infekcija** – invazija i razmnožavanje patogenih organizama u tjelesnim tkivima.

**Integrirana multitrofična akvakultura** – zajednički uzgoj različitih vrsta (npr. riba, rakova, morskih algi) radi recikliranja hranjivih tvari i smanjenja utjecaja na okoliš.

**Integritet ekosustava** – sposobnost ekosustava da održi svoju strukturu, funkcije i procese uz podršku biološkoj raznolikosti i ekološkim interakcijama.

**Izbijanje bolesti** – brzo širenje bolesti, često potaknuto višim temperaturama i lošom kvalitetom vode.

**Karantena** – izolacija ili ograničenje kretanja kako bi se spriječilo širenje zarazne bolesti.

**Klimatske promjene** – dugoročne globalne ili regionalne klimatske promjene povezane s povećanim koncentracijama stakleničkih plinova u atmosferi.

**Klinički znakovi** – vidljivi simptomi bolesti koje je primijetio veterinar ili specijalist (npr. crvenilo, abnormalno plivanje).

**Kvaliteta vode** – fizikalne, kemijske i biološke karakteristike vode koje određuju zdravlje i produktivnost vodenih organizama.

**Mrtve zone** – vodena područja s kritično niskim razinama kisika (često zbog eutrofikacije) u kojima većina morskog života ne može preživjeti.

**MO dijeta** – optimizacija s više ciljeva uzimajući u obzir ekološko, ekonomske i druge čimbenike istovremeno.

**Nedostatak kisika** – stanje vrlo niskog ili odsutnog otopljenog kisika u vodi, što ga čini nenastanjivim za mnoge vodene životinje.

**Nestašica vode** – situacija u kojoj vodni resursi nisu dovoljni za zadovoljavanje ekoloških i ljudskih zahtjeva, posebno u uvjetima klimatskih promjena i intenzivne upotrebe.

**Neto energija** – energija dostupna organizmu.

**Neto nula** – ravnoteža između količine proizvedenih stakleničkih plinova i količine uklonjene iz atmosfere.

**Nitrifikacija** – aerobni proces u kojem bakterije pretvaraju amonijak ( $\text{NH}_4^+$ ) u nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ).

**Offshore akvakultura** – sustavi akvakulture instalirani dalje od obale, gdje su okolišni uvjeti stabilniji, a ekološki utjecaj manji.

**Omjer konverzije hrane** – količina hrane potrebna za proizvodnju određene količine tjelesne mase kod životinja akvakulture.

**Omjer učinkovitosti hrane** – omjer rasta i količine potrošene hrane.

**Opterećenje hranjivim tvarima** – prekomjerni unos dušika i fosfora u vodna tijela iz poljoprivrednih, domaćih ili industrijskih izvora, uzrokujući ekološku neravnotežu.

**Otpornost** – sposobnost vrste ili ekosustava da preživi, oporavi strukturu i funkcije nakon poremećaja u okolišu ili stresora, uključujući klimatske promjene.

**Pametna akvakultura** – upotreba naprednih tehnologija (npr. umjetna inteligencija, IoT, senzori) za upravljanje i optimizaciju sustava akvakulture.

**Patogen** – mikroorganizam (npr. bakterija, virus, parazit) sposoban izazvati bolest u vodenim organizmima.

**Prakse održivog upravljanja** – metode usmjerene na uravnoteženje okolišnih, ekonomskih i društvenih čimbenika za dugoročno očuvanje prirodnih resursa.

**Prebiotici** – dodaci prehrani na bazi vlakana koji potiču rast korisnih crijevnih mikroorganizama.

**Prebiotički dodatak** prehrani – prehrambeni proizvodi (obično bogati vlaknima) koji služe kao prehrana za životinjsku mikrobiotu.

**Prilagodba** – prilagodba promjenjivim uvjetima okoliša, koja se događa prirodnom evolucijom ili tehnološkim intervencijama (npr. selektivni uzgoj radi otpornosti na toplinu).

**Probiotici** – živi mikroorganizmi koji, kada se konzumiraju u dovoljnim količinama, poboljšavaju crijevnu floru i podržavaju zdravlje domaćina. Mogu se naći u hrani ili dodacima prehrani.

**Probiotički dodatak** – prehrambeni proizvodi ili dodaci koji sadrže žive mikroorganizme.

**Procjena životnog ciklusa** – metoda koja se koristi za procjenu utjecaja na okoliš od ekstrakcije sirovina do konačnog proizvoda.

**Recirkulacijski akvakulturni sustavi** – sustavi zatvorene petlje u kojima se voda kontinuirano filtrira i ponovno koristi, omogućujući preciznu kontrolu okoliša i očuvanje vode.

**Sekvestracija ugljika** – proces hvatanja i skladištenja atmosferskog CO<sub>2</sub>-a, često prirodnim sredstvima kao što je uzgoj morskih algi.

**Selekcija potpomognuta markerima** – biotehnoška metoda koja koristi genetske markere za odabir jedinki sa željenim osobinama za uzgoj, povećavajući učinkovitost selektivnog uzgoja.

**Selektivni uzgoj** – proces odabira roditeljskih organizama sa poželjnim svojstvima za proizvodnju potomstva sa sličnim ili poboljšanim karakteristikama (npr. brži rast ili otpornost na bolesti).

**Staklenički plinovi** – plinovi kao što su ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) i dušikov oksid (N<sub>2</sub>O) koji zadržavaju toplinu u atmosferi i doprinose globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama.

**Strategije ublažavanja** – mjere za smanjenje štetnih učinaka klimatskih promjena ili promjena okoliša (npr. smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, provedba održivih praksi).

**Štetno cvjetanje algi** – brzi porast algi koje proizvode toksine ili smanjuju razinu kisika, šteteći vodenom životu i ljudskom zdravlju..

**Toplinska stratifikacija** – stvaranje temperaturnih slojeva u vodenom tijelu koji ometaju vertikalno kretanje hranjivih tvari i kisika, potencijalno uzrokujući hipoksična stanja.

**Toplinski stres** – fiziološki stres koji proizlazi iz temperature vode izvan optimalnog raspona organizma, a utječe na rast ili reprodukciju.

**Transgene vrste** – genetski modificirani organizmi s umetnutim genima drugih vrsta. U akvakulturi mogu rasti brže ili imati veću otpornost na bolesti.

**Trofičke razine** – hijerarhijske razine u hranidbenom lancu, kroz koje energija teče od primarnih proizvođača (npr. biljaka ili algi) do potrošača (biljojedi, grabežljivci) i razlagači.

**Ugljični otisak** – ukupna količina stakleničkih plinova (uglavnom CO<sub>2</sub>, ali i metana i dušikovog oksida) proizvedenih ljudskim aktivnostima, proizvodnjom proizvoda ili uslugama. Pomaže u procjeni utjecaja mjera kao što su promet, upotreba energije, proizvodnja hrane ili industrija na klimu. Manji otisak znači manji utjecaj na okoliš.

**Usluge ekosustava** – koristi koje ljudi dobivaju od prirodnih ekosustava, kao što su opskrba hranom, pročišćavanje vode i sekvestracija ugljika. Cilj održive akvakulture je očuvati ili poboljšati te usluge.

**UV sterilizacija** – upotreba ultraljubičastog svjetla za ubijanje patogena u vodi, posebno u RAS sustavima.

***Vibrio* spp.** – skupina bakterija koje uspijevaju u toplim vodama, a za koje se zna da uzrokuju bolesti kod riba i kozica.

**Vodeni ekosustav** – okoliš na bazi vode u kojem živi organizmi djeluju međusobno i s fizičkim okruženjem.

**Zakiseljavanje** – proces u kojem se pH vode smanjuje, čineći je kiselijom. U oceanima se to prvenstveno događa zbog apsorpcije CO<sub>2</sub> iz atmosfere.

**Zakiseljavanje oceana** – smanjenje pH oceana zbog prekomjerne apsorpcije CO<sub>2</sub> u atmosferi, što utječe na kalcificirajuće organizme poput mekušaca i koralja.

**Zatvoreni RAS** – sustav u kojem se voda reciklira u kontroliranom okruženju, smanjujući potrošnju vode i utjecaj na okoliš