

**ERASMUS+
KA220-HED – Partnerstva za suradnju u visokom obrazovanju**

***The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future - Curriculum
Innovations in Aquaculture [DiBluCa]
(2023-1-LT01-KA220-HED-000154247)***

**Smjernice najbolje prakse za
znanstvenike/nastavnike/trenere/studente i donositelje
odluka u akvakulturi**

Ovaj projekt financiran je uz potporu Europske komisije. Ova publikacija odražava samo stavove autora i projektnih partnera te se Komisija ne može smatrati odgovornom za bilo kakvu upotrebu informacija sadržanih u njoj.

Identifikacija:	WP3A3
Naslov:	Smjernice najbolje prakse za znanstvenike/nastavnike/trenere/studente i donositelje odluka u akvakulturi
Status:	Finalni
Pripremili:	prof. dr. sc. Vlasta Bartulović; UNIDU, HR izv. prof. Tatjana Dobroslavić; UNIDU, HR prof. dr. sc. Halyna Krusir; UNUT, UA prof. dr. sc. Maryna Mardar; ONUT, UA prof. dr. sc. Olha Sahdieieva; ONUT, UA
Mjesto izrade/datum:	Dubrovnik, Hrvatska Odesa, Ukrajina <i>01.07.2025-30.09.2025</i>

Smjernice najbolje prakse za znanstvenike/nastavnike/trenere/studente i donositelje odluka u akvakulturi

Akvakultura je ključna za globalnu sigurnost hrane i gospodarski rast, ali klimatske promjene prijetu njezinoj održivosti zbog porasta temperature, zakiseljavanja oceana, promjena saliniteta i širenja bolesti. Ovaj vodič pruža strategije utemeljene na dokazima za poboljšanje otpornosti akvakulture, utjecaje na kvalitetu vode, zdravlje vrsta i ekološki otisak akvakulture. Analizira rješenja kao što su recirkulacijski akvakulturni sustavi (RAS), integrirana multitrofička akvakultura (IMTA), biotehnološki postupci kao što je CRISPR-Cas9 i održive prakse hranjenja za ublažavanje utjecaja na okoliš i potporu očuvanju biološke raznolikosti.

Svrha. Ovaj dokument daje praktične preporuke za prilagodbu akvakulture klimatskim promjenama te osiguravanje održivosti i sigurnosti opskrbe hranom. Cilj mu je dionicima pružiti alate za rješavanje ekoloških izazova i promicanje otpornih vodenih ekosustava.

Kome je namijenjen. Ovaj je vodič namijenjen znanstvenicima, nastavnicima, studentima i donositeljima odluka, uključujući kreatore politika i stručnjake iz industrije. Te su skupine ključne za provedbu inovativnih i održivih praksi u akvakulturi.

Kako koristiti ovaj dokument. Svaki se odjeljak bavi specifičnim učincima klimatskih promjena na akvakulturu i utjecajima akvakulture na okoliš te završava ključnim preporukama i praktičnim mjerama. Čitatelji se potiču da se uključe u odjeljke koji su relevantni za njihovu ulogu i primijene strategije za održive prakse. Vodič podržava i teoretsko razumijevanje i djelotvorne korake za praktičnu primjenu.

Ishodi učenja za DiBluCa smjernice za najbolju praksu

Ovaj vodič omogućuje čitateljima da razviju znanja i vještine potrebne za održivu akvakulturu u kontekstu klimatskih promjena kroz sljedeće ishode učenja:

Razumjeti utjecaje klimatskih promjena:

Objasniti kako globalno zatopljenje utječe na vodene ekosustave i akvakulturu povećanjem temperature, promjenama saliniteta, zakiseljavanjem i širenjem bolesti.

Primijeniti otporne sustave:

Razumjeti inovativne akvakulturne sustave kao što su RAS, IMTA i offshore akvakultura za ublažavanje stresora povezanih s klimom.

Istražiti biotehnološke primjene:

Razumjeti potencijal biotehnologija kao što su CRISPR–Cas9 i genomska selekcija za poboljšanje otpornosti vrsta, uzimajući u obzir etičke i ekološke implikacije.

Usvojiti održive prakse hranidbe uzgojnih organizama:

Koristite alternativne izvore hrane (npr. brašno od kukaca, alge) i napredne tehnologije hranjenja kako biste smanjili utjecaj na okoliš.

Promovirati rješenja uz zajedničku suradnju:

Zagovarati političke okvire i suradnju dionika kako bi se podržale održive prakse akvakulture i sigurnost hrane.

Sadržaj

Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode i utjecaj na akvakulturu	6
Utjecaj akvakulture na okoliš iz perspektive globalnog zatopljenja	9
Globalno zatopljenje i uzgoj, biotehnologija u akvakulturi	13
Što bi trebalo promijeniti u hrani i hranidbi u akvakulturi zbog globalnog zatopljenja	17
Učinci globalnog zatopljenja na bolesti u akvakulturi i zaštitne primjene	22
Odabir sustava za akvakulturu pod globalnim zatopljenjem	26
Reference	29
Ključne preporuke za akvakulturu otpornu na klimatske promjene	31

Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode i utjecaj na akvakulturu

Uvod

Globalno zatopljenje mijenja vodene ekosustave, dolazi do promjena u temperaturi, salinitetu i dinamici hranjivih tvari koje dovode u pitanje otpornost morskog i slatkovodnog okoliša. Te promjene utječu na fiziološke procese vodenih organizama, kvalitetu vode i održivost industrija kao što je akvakultura. Ovo poglavlje ispituje višestruke utjecaje klimatskih promjena na vodene sustave i naglašava potrebu za strategijama prilagodbe za ublažavanje ekoloških i socioekonomskih posljedica.

Učinci temperature na vodene vrste

Globalni porast temperature ubrzava metabolizam vodenih organizama, što povećava njihovu potrebu za kisikom i često dovodi do smanjenog rasta i reproduktivnog uspjeha. Toplije vode uzrokuju da se vrste više ne nalaze u svom optimalnom temperaturnom rasponu, što dovodi do fiziološkog stresa i veće stope smrtnosti (DeNicola i sur., 2015). Te promjene utječu na ekosustave, narušavaju biološku raznolikost i destabiliziraju prehrambene mreže. Topliji uvjeti pogoduju i širenju patogena i parazita, što dodatno ugrožava opstanak vrsta i produktivnost akvakulture (Moussa i sur., 2025).

Fluktuacije saliniteta i dinamika ekosustava

Klimatske promjene, kao što su otapanje leda na polovima i promjene u obrascima oborina, dovode do znatnih fluktuacija saliniteta u obalnim ekosustavima i ekosustavima estuarija. Te fluktuacije utječu na rasprostranjenost i opstanak vrsta osjetljivih na sol, prijeti biološkoj raznolikosti i otežavaju operacije u akvakulturi (Guimbeau i sur., 2024). Na primjer, u regijama u blizini slatkovodnih priljeva postoje izraženi pomaci saliniteta koji dovode u pitanje sposobnost prilagodbe morskih organizama i mijenjaju dinamiku ekosustava (Mensah i sur., 2025). Suočavanje s tim promjenama zahtijeva prilagodljivo upravljanje kako bi se održala ekološka ravnoteža.

Opterećenje hranjivim tvarima i eutrofikacija

Antropogene aktivnosti povezane s klimatskim promjenama povećavaju opterećenje hranjivim tvarima iz poljoprivrede i urbanog onečišćenja, što potiče eutrofikaciju vodenih sustava. Ovaj proces može dovesti do štetnog cvjetanja algi (HAB), iscrpljivanja kisika i degradacije ekosustava sa značajnim ekološkim i ekonomskim utjecajima (Zhang i sur., 2024). Učinkovite mjere ublažavanja uključuju smanjenje unosa hranjivih tvari kroz održive prakse korištenja zemljišta i promicanje suradnje među dionicima kako bi se obnovilo zdravlje ekosustava (Mensah i sur., 2025).

Problemi s nestašicom i kvalitetom vode

Globalno zatopljenje pogoršava nestašicu vode narušavajući hidrološke cikluse sušama i nepredvidivim obrascima padalina. Istodobno, onečišćenje i loše upravljanje pogoršavaju kvalitetu vode i predstavljaju prijetnju ekosustavima i ljudskoj populaciji (DeNicola i sur., 2015). Ti izazovi ugrožavaju sigurnost vode, posebno u regijama koje se oslanjaju na stalnu opskrbu slatkom vodom. Održivo upravljanje vodama, uključujući inovativne tehnike očuvanja i međunarodnu suradnju, ključno je za zaštitu ovog vitalnog resursa (Moussa i sur., 2025).

Akvakultura pod pritiskom

Akvakultura se suočava s velikim izazovima zbog porasta temperature vode, promjene oceanskih struja i promjene obrazaca oborina. Ti čimbenici mijenjaju prikladnost tradicionalnih područja akvakulture i zahtijevaju premještanje uzgajališta u profitabilnija područja. Toplije vode također povećavaju prevalenciju bolesti i invazivnih vrsta koje narušavaju autohtone ekosustave i smanjuju prinose (DeNicola i sur., 2015). Integracija tradicionalnog znanja ekologije s modernim tehnologijama može poboljšati otpornost akvakulture i osigurati njezinu ulogu u globalnoj sigurnosti opskrbe hranom (Moussa i sur., 2025).

Toplinska stratifikacija i iscrpljivanje kisika

Toplinska stratifikacija, pogoršana globalnim zagrijavanjem, smanjuje dostupnost kisika u vodenim sustavima, stvarajući hipoksične zone koje prijete vodenom životu. Te promjene narušavaju ekološku ravnotežu i imaju gospodarske posljedice za ribarstvo i akvakulturu. Razumijevanje međudjelovanja fizičkih, kemijskih i bioloških procesa ključan je preduvjet za razvoj ciljanih strategija ublažavanja, kao što su poboljšana cirkulacija vode i održive prakse upravljanja.

Strategije prilagodbe i ublažavanja

Za rješavanje utjecaja klimatskih promjena na vodene ekosustave potreban je holistički pristup. Ključne strategije uključuju:

- Održive prakse: korištenje ekološki prihvatljivih tehnika u akvakulturi i smanjenje otjecanja hranjivih tvari poboljšanim upravljanjem zemljištem.
- Politički okvir: Razviti dobre politike za reguliranje korištenja voda i zaštitu biološke raznolikosti.
- Tehnološke inovacije: Korištenje naprednih sustava kao što su sustavi praćenja u stvarnom vremenu za praćenje promjena u okolišu.
- Suradnja dionika: Poticanje partnerstava između znanstvenika, kreatora politika i lidera u industriji radi razvoja otpornih rješenja.

Zaključak

Klimatske promjene predstavljaju složene izazove za vodene ekosustave, u rasponu od fiziološkog stresa izazvanog temperaturom do fluktuacija saliniteta i eutrofikacije izazvane hranjivim tvarima. Ti problemi ugrožavaju biološku raznolikost, kvalitetu vode i održivost akvakulture, s dalekosežnim socioekonomskim posljedicama. Davanjem prioriteta strategijama prilagodbe, integracijom znanstvenih i tradicionalnih spoznaja te promicanjem globalne suradnje moguće je ublažiti te utjecaje i osigurati otpornost vodenih sustava za buduće generacije.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Porast temperature vode
- Fluktuacije saliniteta
- Iscrpljivanje kisika i hipoksične zone
- Štetno cvjetanje algi (HAB)

Preporuke:

- **Praćenje i reagiranje:** Kontinuirano pratiti temperaturu, otopljeni kisik i hranjive tvari s pragovima upozorenja.
- **Nadogradnja sustava:** Instalirati i održavati prozračivanje i cirkulaciju vode kako bi se spriječila hipoksija.
- **Spriječiti na izvoru:** Smanjiti otjecanje hranjivih tvari kroz tampon pojaseve i održivo upravljanje zemljištem.
- **Planirati unaprijed:** Pripremiti izvanredne mjere za toplinske valove i ekstremne vremenske uvjete.

Lista za provjeru:

- Pratimo li temperaturu, otopljeni kisik i hranjive tvari u stvarnom vremenu s definiranim pragovima?
- Jesu li sustavi za prozračivanje i cirkulaciju učinkovito instalirani i održavani?
- Provode li se mjere za smanjenje otjecanja hranjivih tvari iz okolnog zemljišta?
- Postoji li plan za nepredviđene situacije za toplinske valove i ekstremne vremenske uvjete?

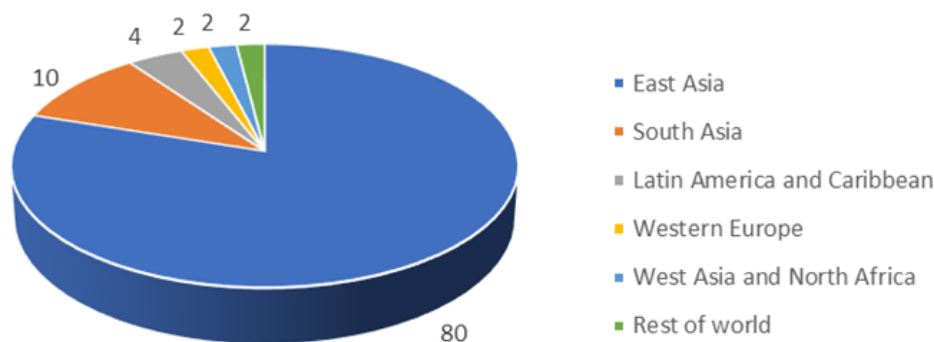
Utjecaj akvakulture na okoliš iz perspektive globalnog zatopljenja

Uvod

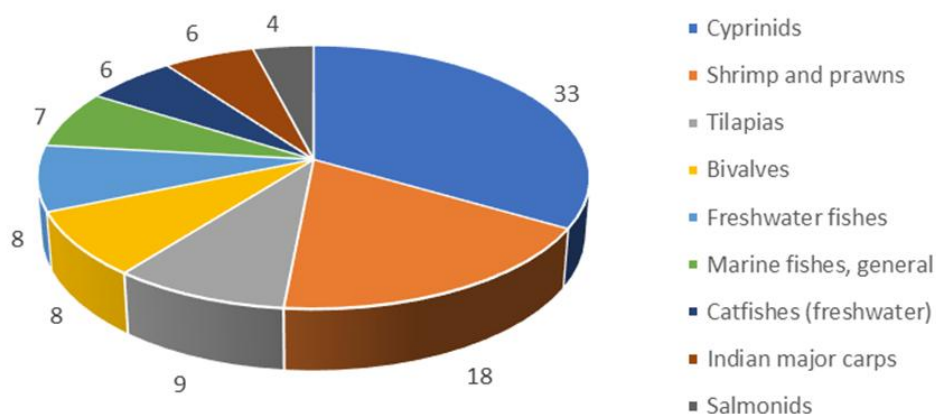
Akvakultura je temelj globalne sigurnosti hrane, ali njezin brzi rast pogoršava ekološke izazove klimatskih promjena. Industrija doprinosi emisijama stakleničkih plinova, degradaciji staništa i iscrpljivanju resursa, pogoršavajući pritiske na okoliš. Ovo poglavlje ispituje ekološki otisak akvakulture, s naglaskom na emisije, prenamjenu zemljišta, proizvodnju hrane za životinje i odlaganje otpada. Istodobno se identificiraju održive strategije za usklađivanje rasta industrije s ekološkom odgovornošću.

Emisije stakleničkih plinova u akvakulturi

Operacije u akvakulturi ispuštaju značajne stakleničke plinove, uključujući ugljični dioksid (CO_2), metan (CH_4) i dušikov oksid (N_2O), koji zadržavaju toplinu i pogoršavaju globalno zatopljenje (Wróbel i sur., 2023). Energetski intenzivni procesi kao što su prozračivanje i crpljenje vode često se oslanjaju na električnu energiju iz fosilnih goriva, posebno u regijama koje ovise o ugljenu ili nafti (Bujas i sur., 2022). Emisije metana nastaju anaerobnim uvjetima u ribnjacima, dok dušikov oksid nastaje viškom hrane i gnojiva u okruženjima bogatim dušikom (MacLeod i sur., 2019). Prema IPCC-u, te emisije doprinose promjeni vremenskih obrazaca, porastu razine mora i gubitku biološke raznolikosti.



Slika 1. Postotni udio ukupnih emisija stakleničkih plinova po regijama (MacLeod i sur., 2019)



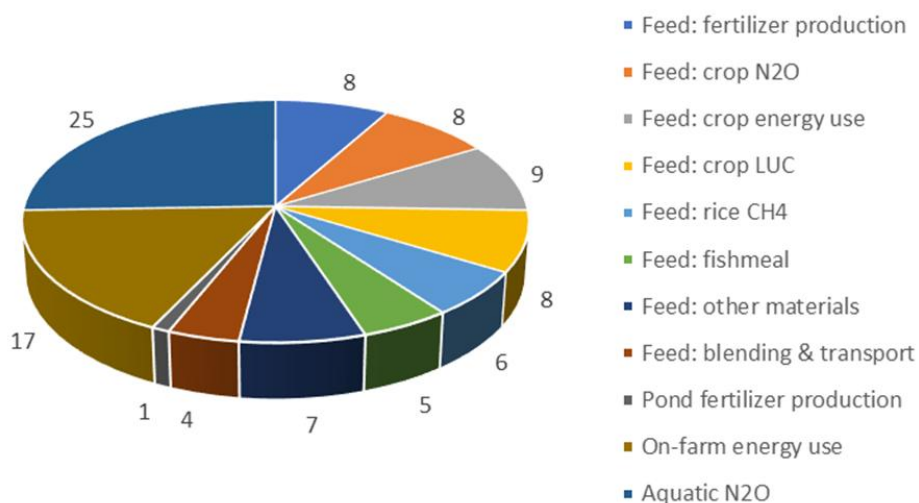
Slika 2. Postotni udio ukupnih emisija stakleničkih plinova po skupinama uzgajanih vrsta (MacLeod i sur., 2019)

Uništavanje staništa i promjene u korištenju zemljišta

Širenje akvakulture dovelo je do znatne prenamjene staništa, posebno u ekološki osjetljivim obalnim ekosustavima kao što su mangrove i močvare. Krčenje šuma na tim područjima za uzgajališta kozica i ribnjake dovodi do gubitka biološke raznolikosti, obalne erozije i smanjene sekvestracije ugljika (Barbier i sur., 2011). Te promjene narušavaju usluge ekosustava, slabe prirodnu obranu od klimatskih utjecaja i pogoršavaju degradaciju okoliša. Strategije odgovornog korištenja zemljišta ključne su za očuvanje ovih važnih staništa.

Proizvodnja hrane za životinje: važan čimbenik utjecaja na okoliš

Proizvodnja hrane za životinje čini najveći udio u ekološkom otisku akvakulture i odgovorna je za do 90 % emisija stakleničkih plinova (FAO, 2022). Uzgoj ribljeg brašna i biljnih sastojaka hrane kao što je soja zahtijeva puno zemlje, vode i energije, što pridonosi krčenju šuma i iscrpljivanju resursa. Nove alternative kao što su proteini na bazi kukaca obećavaju, ali imaju problema sa skalabilnošću zbog ekonomskih i logističkih prepreka. Optimizacija učinkovitosti hrane i istraživanje održivih izvora hrane za životinje ključni su za smanjenje tih utjecaja.



Slika 3. Postotni udio emisija stakleničkih plinova po kategoriji izvora (MacLeod i sur., 2019)

Proizvodnja otpada i kvaliteta vode

Akvakultura stvara znatne količine otpada, uključujući nepojedenu hranu, riblje izlučevine i kemijske ostatke koji pogoršavaju kvalitetu vode i uzrokuju eutrofikaciju (Wu, 1995; Dalsgaard i Krause-Jensen, 2006). Taj otpad doprinosi štetnom cvjetanju algi i iscrpljivanju kisika te narušava vodene ekosustave (Holmer i sur., 2008). Osim toga, upotreba antibiotika u uzgoju ribe izaziva zabrinutost zbog otpornosti na antibiotike, što predstavlja prijetnju okolišu i ljudskom zdravlju. Učinkoviti sustavi gospodarenja otpadom ključni su za ublažavanje tih učinaka.

Održive prakse za akvakulturu

Kako bi se odgovorilo na ekološke izazove akvakulture, industrija mora usvojiti održive prakse, uključujući:

- Integraciju obnovljive energije: prelazak na solarnu energiju, vjetar ili druge obnovljive izvore energije kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima.
- Optimizaciju hrane: razvoj ekološki prihvatljivih alternativa hrani i poboljšanje pretvorbe hrane kako bi se smanjila potrošnja resursa.
- Odgovorno upravljanje zemljištem: zaštita mangrova i močvara kroz strateško lociranje i mjere obnove.
- Rješenja za gospodarenje otpadom: uvođenje sustava zatvorene petlje i naprednih sustava filtracije radi smanjenja onečišćenja i eutrofikacije.

Zaključak

Uloga akvakulture u globalnoj sigurnosti opskrbe hranom je neosporna, ali njezini utjecaji na okoliš – emisije stakleničkih plinova, gubitak staništa, resursno intenzivna proizvodnja hrane za životinje i

stvaranje otpada – predstavljaju veliki izazov u kontekstu klimatskih promjena. Davanjem prioriteta održivim praksama i poticanjem suradnje između dionika, industrija može smanjiti svoj ekološki otisak dok istovremeno zadovoljava rastuću potražnju za hranom iz akvakulture. Inovativna rješenja koja se temelje na odgovornosti za okoliš ključna su za dugoročnu održivost akvakulture i zdravlje globalnih ekosustava.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Visoke emisije stakleničkih plinova iz potrošnje energije i procesa u ribnjacima
- Uništavanje staništa i neodrživo korištenje zemljišta
- Proizvodnja hrane za životinje koja zahtijeva velike resurse
- Stvaranje otpada i onečišćenje vode

Preporuke:

- **Integriranje obnovljivih izvora energije:** Prebaciti prozračivanje, crpljenje i grijanje na solarnu energiju, vjetar ili druge obnovljive izvore energije.
- **Optimiziranje hrane za životinje:** Poboljšati omjere konverzije hrane za životinje i usvojiti održive alternative (kukci, alge, nusproizvodi).
- **Zaštita staništa:** Izbjegavati prenamjenu mangrova i močvara; podržati inicijative za obnovu.
- **Gospodarenje otpadom:** Primijeniti zatvorene petlje ili napredne sustave filtracije kako bi se smanjilo onečišćenje i eutrofikacija.

Lista za provjeru:

- Koriste li se obnovljivi izvori energije za osnovne akvakulturne djelatnosti?
- Jesu li usvojeni održivi ili alternativni sastojci hrane za životinje?
- Jesu li staništa (mangrove, močvare) zaštićena ili obnovljena u planiranju poljoprivrednih gospodarstava?
- Jesu li uspostavljeni sustavi gospodarenja otpadom kako bi se smanjilo ispuštanje hranjivih tvari i onečišćenje vode?

Globalno zatopljenje i uzgoj, biotehnologija u akvakulturi

Uvod

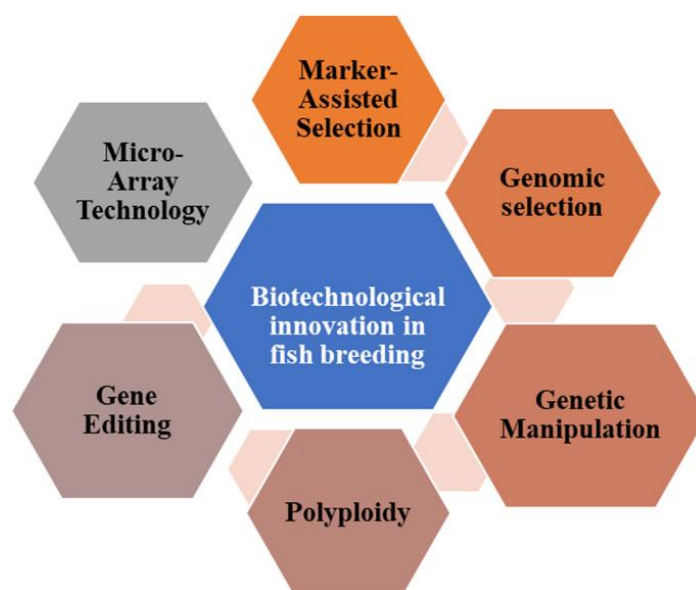
Na vodene ekosustave, koji su ključni za biološku raznolikost i ljudsku egzistenciju, ozbiljno utječe globalno zatopljenje, koje mijenja reproduktivne cikluse, stope preživljavanja i genetsku raznolikost vodenih vrsta. Kako akvakultura nastoji zadovoljiti sve veću globalnu potražnju za hranom, biotehnološke inovacije nude obećavajuća rješenja za poboljšanje otpornosti i održivosti. Ovo poglavlje ispituje kako klimatske promjene utječu na vodene vrste i ulogu naprednih biotehnologija - kao što su selektivni uzgoj, genomska selekcija, uređivanje gena CRISPR-Cas9 i krioprezervacija - u rješavanju ovih izazova. Također se bavi etičkim, ekološkim i regulatornim pitanjima koja su ključna za odgovorne inovacije (Tompkins i sur., 2017).

Učinci klimatskih promjena na vodene vrste

Porast temperature vode narušava procese razmnožavanja i razvoja vodenih organizama. Promjena sezone mriješćenja uzrokovana toplijim vodama dovodi do neusklađenosti između dostupnosti hrane i stope preživljavanja ličinki vrsta kao što su bakalar i smuđ. Povišene temperature također smanjuju razinu otopljenog kisika, što uzrokuje stres kod mladih riba i utječe na njihov rast. Iako neke vrste imaju genetske prilagodbe, brzi tempo promjena u okolišu često premašuje njihovu sposobnost prilagodbe i ugrožava stabilnost populacija i funkcionalnost ekosustava (Durant i sur., 2007).

Selektivni uzgoj i genomska selekcija

U akvakulturi se selektivni uzgoj koristi za poboljšanje osobina kao što su tolerancija na toplinu, otpornost na bolesti i učinkovitost rasta. Genomska selekcija ubrzava ovaj proces identificiranjem genetskih markera koji su povezani sa poželjnim osobinama i omogućuju brže širenje rezistentnih sojeva. Na primjer, atlantski losos uzgajan je da izdrži više temperature i uvjete s niskim udjelom kisika, dok sojevi kalifornijske pastrve imaju poboljšanu otpornost na patogene. Ovaj napredak povećava produktivnost i prilagodljivost u teškim uvjetima okoliša (Houston i sur., 2018).



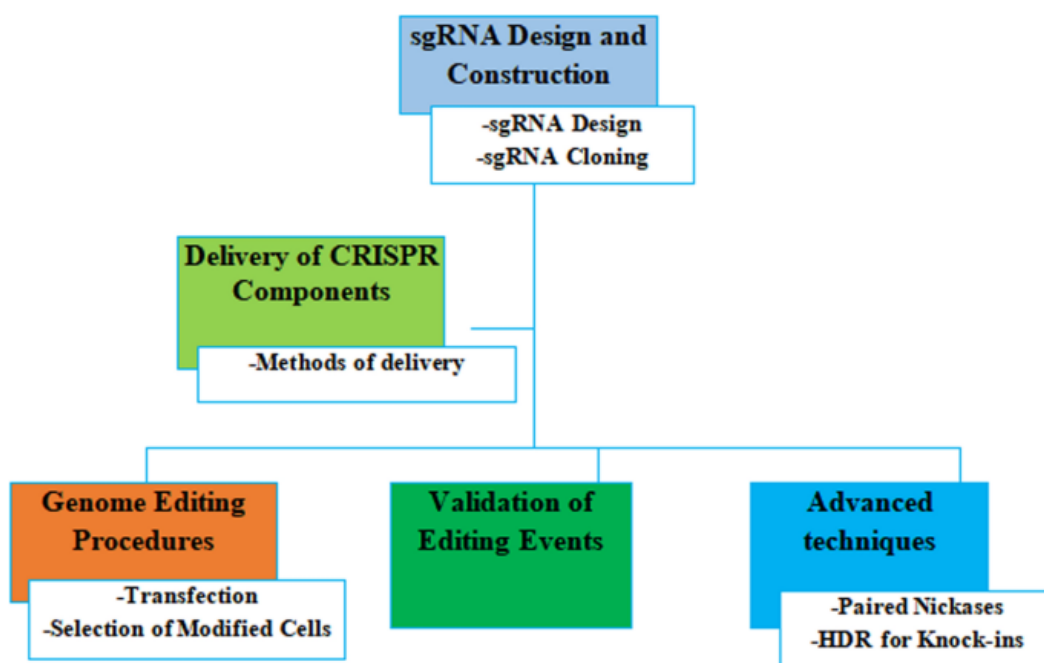
Slika 4. Biotehnološke inovacije u uzgoju ribe

CRISPR–Cas9: promjena paradigme za akvakulturu

Uređivanje gena CRISPR–Cas9 omogućuje preciznu modifikaciju genoma riba, poboljšavajući osobine koje su ključne za održivost akvakulture. Ciljajući gene kao što je miostatin (mstn), istraživači su uspjeli poboljšati stope rasta i kvalitetu mišića kod vrsta kao što su nilska tilapija i kanalski som. Slično tome, promjene gena povezanih s imunološkim sustavom povećale su otpornost na bolesti kod atlantskog lososa i amura. CRISPR također olakšava određivanje spola i sterilnost, što smanjuje ekološke rizike od križanja odbjeglih uzgojenih riba s divljim populacijama. Međutim, potencijalni neciljani učinci zahtijevaju pomno praćenje i daljnja istraživanja (Yang i sur., 2021).

Krioprezervacija za genetsko očuvanje

Krioprezervacija uključuje očuvanje spolnih stanica i embrija na ekstremno niskim temperaturama, što podržava očuvanje biološke raznolikosti i fleksibilne programe uzgoja. Ova tehnologija omogućuje cjelogodišnji uzgoj i očuvanje genetske raznolikosti u različitim regijama. Unatoč svom potencijalu, izazovi kao što su osjetljivost na hladnoću i toksičnost krioprotektanata u jajnim stanicama i embrijima zahtijevaju kontinuiranu optimizaciju protokola za poboljšanje učinkovitosti (Betsy i sur., 2022), (Sankaran i Mandal, 2024).



Slika 5. CRISPR–Cas9 uređivanje gena (Sankaran & Mandal, 2024)

Etička i ekološka razmatranja

Biotehnološki napredak izaziva znatne etičke i ekološke probleme. Genetski modificirani organizmi (GMO) koji ulaze u ekosustave mogli bi ugroziti genetski integritet i biološku raznolikost. Čvrsti regulatorni okviri ključni su za procjenu rizika, praćenje učinka i uključivanje dionika. Dobrobit životinja također mora biti prioritet kako bi se osiguralo da genetske modifikacije ne ugrožavaju zdravlje riba. Transparentno upravljanje i javni dijalog ključni su za pomirenje inovacija i odgovornosti za okoliš (Fletcher i Rise, 2012).

Održiva integracija biotehnologije

Kako bi se osigurala dugoročna održivost akvakulture, biotehnologija se mora integrirati s održivim praksama. Ključne strategije uključuju:

- Optimizirani programi uzgoja: Korištenje genomskih alata za poboljšanje otpornosti bez ekološke štete.
- Napredno praćenje: Implementiranje sustava u stvarnom vremenu za praćenje utjecaja GMO-a na ekosustave.
- Etičko upravljanje: Razvoj politika koje daju prednost dobrobiti životinja i biološkoj raznolikosti.
- Suradnja s dionicima: Poticanje partnerstava između znanstvenika, regulatora i zajednica kako bi se inovacije uskladile s ciljevima održivosti.

Zaključak

Biotehnološke inovacije kao što su selektivni uzgoj, genomska selekcija, CRISPR–Cas9 i krioprezervacija nude transformativni potencijal za rješavanje izazova klimatskih promjena u

akvakulturi. Poboljšanjem otpornosti i produktivnosti vrsta ove tehnologije doprinose globalnoj sigurnosti opskrbe hranom i očuvanju biološke raznolikosti. Međutim, njihov uspjeh ovisi o etičkoj provedbi, zdravoj regulaciji i interdisciplinarnoj suradnji kako bi se smanjili rizici za okoliš i osigurali održivi ishodi. Akvakultura stoga može imati središnju ulogu u rješavanju dvostruke krize klimatskih promjena i sigurnosti opskrbe hranom.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Poremećeni reproduksijski ciklusi i smanjena sposobnost prilagodbe u uvjetima promjena
- Etički i ekološki rizici od biotehnologije (bijeg GMO-a, gubitak biološke raznolikosti, dobrobit životinja)
- Neciljani učinci i nesigurnost u CRISPR-Cas9 primjenama
- Regulatorne prepreke i ograničena skalabilnost naprednih tehnologija

Preporuke:

- **Ojačati uzgoj:** Proširiti selektivni uzgoj i genomske alate za poboljšanje toplinske tolerancije, rasta i otpornosti na bolesti.
- **Kontrolno uređivanje gena:** Primijeniti stroge protokole praćenja i validacije za CRISPR-Cas9 kako bi se smanjio rizik izvan cilja.
- **Očuvanje raznolikosti:** Uložiti u istraživanje krioprezervacije kako bi se zaštitile spolne stanice, embriji i biološka raznolikost.
- **Osiguranje upravljanja:** Uspostaviti pravne okvire koji daju prednost etici, zaštiti biološke raznolikosti i dobrobiti životinja.
- **Poticanje suradnje:** Promicati dijalog među znanstvenicima, regulatorima i zajednicama za odgovorne inovacije.

Lista za provjeru:

- Provode li se programi selektivnog uzgoja ili genomske selekcije kako bi se povećala otpornost na klimatske promjene?
- Prate li se aplikacije CRISPR-Cas9 zbog ne ciljnih učinaka i ekoloških rizika?
- Primjenjuju li se tehnike krioprezervacije za očuvanje genetskih resursa?
- Slijede li se etički i regulatorni okviri aktivno u biotehnološkim procesima?
- Postoji li suradnja dionika kako bi se osigurala odgovorna i transparentna upotreba biotehnologije?

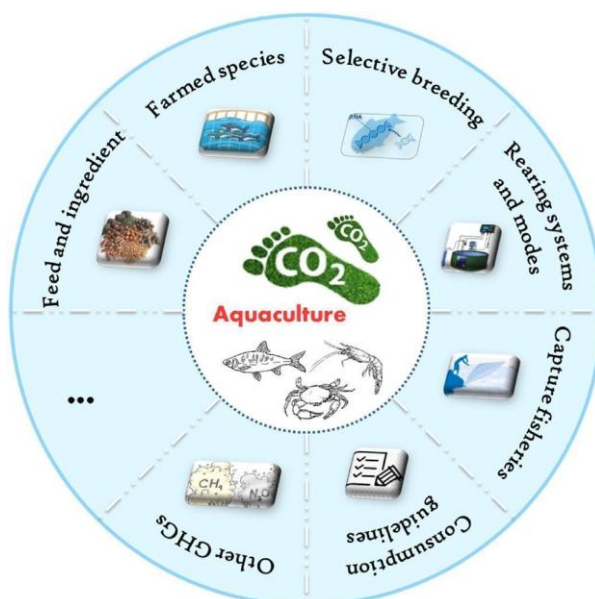
Što bi trebalo promijeniti u hrani i hranidbi u akvakulturi zbog globalnog zatopljenja

Uvod

Akvakultura, sektor koji se brzo širi, ključan je za zadovoljavanje globalne potražnje za hranom i ima relativno mali utjecaj na klimu u usporedbi s drugim izvorima proteina. S obzirom na to da se predviđa da će uzgoj ribe porasti za 32 % do 2030. (FAO, 2020), ključno je osigurati održivost uz istodobno rješavanje izazova klimatskih promjena. U ovom se poglavlju ispituje utjecaj akvakulture na okoliš, posebno njezin ugljični otisak, te se istražuju inovativne strategije za hranu za životinje za poboljšanje otpornosti i smanjenje ekološke štete. Integracijom naprednih tehnologija i alternativnih sastojaka akvakultura može postići ciljeve održivog razvoja i cilj nulte neto stope emisija.

Utjecaj akvakulture na okoliš

Akvakultura uzrokuje znatne emisije stakleničkih plinova, a globalni uzgoj ribe godišnje proizvede oko 250 milijuna tona ekvivalenta CO₂ (MacLeod i sur., 2020). U uzgoju lososa hrana za životinje čini oko 75% emisija, što samo u Norveškoj iznosi 10 milijuna tona ekvivalenta CO₂ godišnje (Ziv-Douki, 2020). Iako proizvodnja organizama u akvakulturi ima manji ugljični otisak od govedine, klimatske promjene pogoršavaju izazove kao što su smanjena dostupnost hranjivih tvari, pogoršanje kvalitete vode i povećana virulencija patogena (Cheung i sur., 2023). Ti čimbenici ugrožavaju rast i zdravlje hladnovodnih vrsta i slabe ponore ugljika u oceanima, što zahtijeva ciljane intervencije u proizvodnji hrane za životinje.



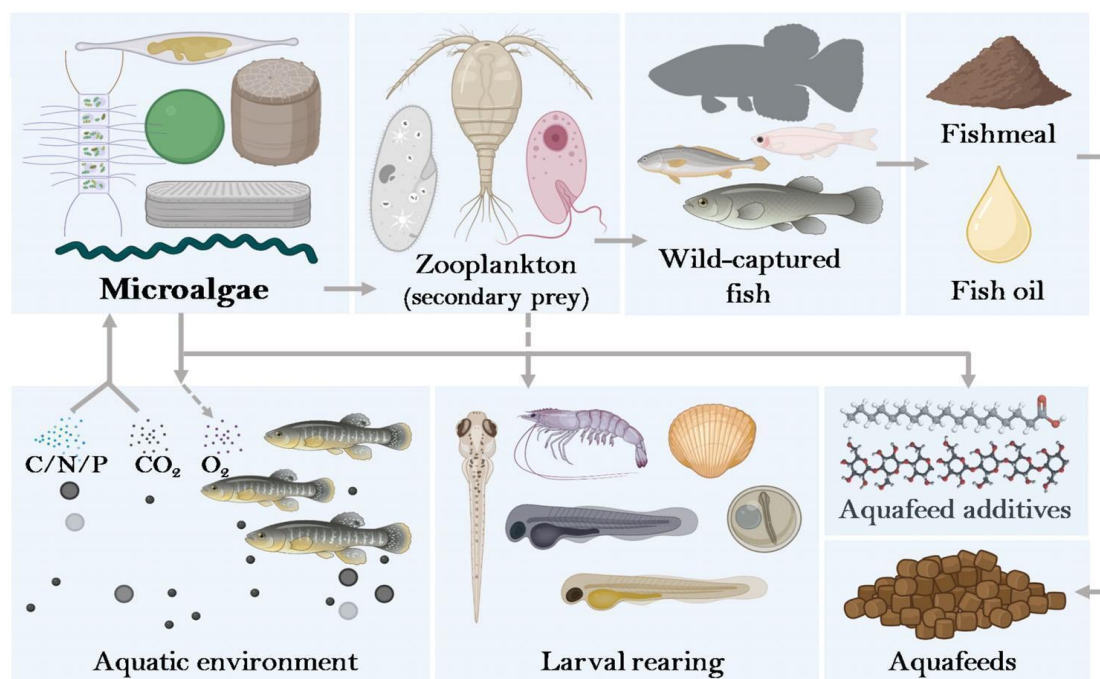
Slika 6. Intervencijski sektori za smanjenje emisija ugljika u akvakulturi (prilagođeno iz Zhang i sur., 2024)

Klimatski izazovi za formulaciju hrane za životinje

Porast temperature vode povećava brzinu metabolizma vrsta u akvakulturi, što zahtijeva prilagodbu sastava hrane kako bi se zadovoljile povećane potrebe za hranjivim tvarima. Promijenjeni omjer proteina, lipida i ugljikohidrata neophodan je za optimalan rast i dobro zdravlje u toplijim uvjetima (Zhang i sur., 2024). Osim toga, zakiseljavanje oceana utječe na fiziologiju probavne, pa su za ublažavanje učinaka potrebni dodaci hrani kao što su puferska sredstva. Klimatske promjene također kompliciraju opskrbu konvencionalnim ribljim brašnom i ribljim uljem, naglašavajući potrebu za održivim alternativama za održavanje kvalitete i sigurnosti hrane (Ma i Hu, 2023).

Inovacije u održivim sastojcima hrane za životinje

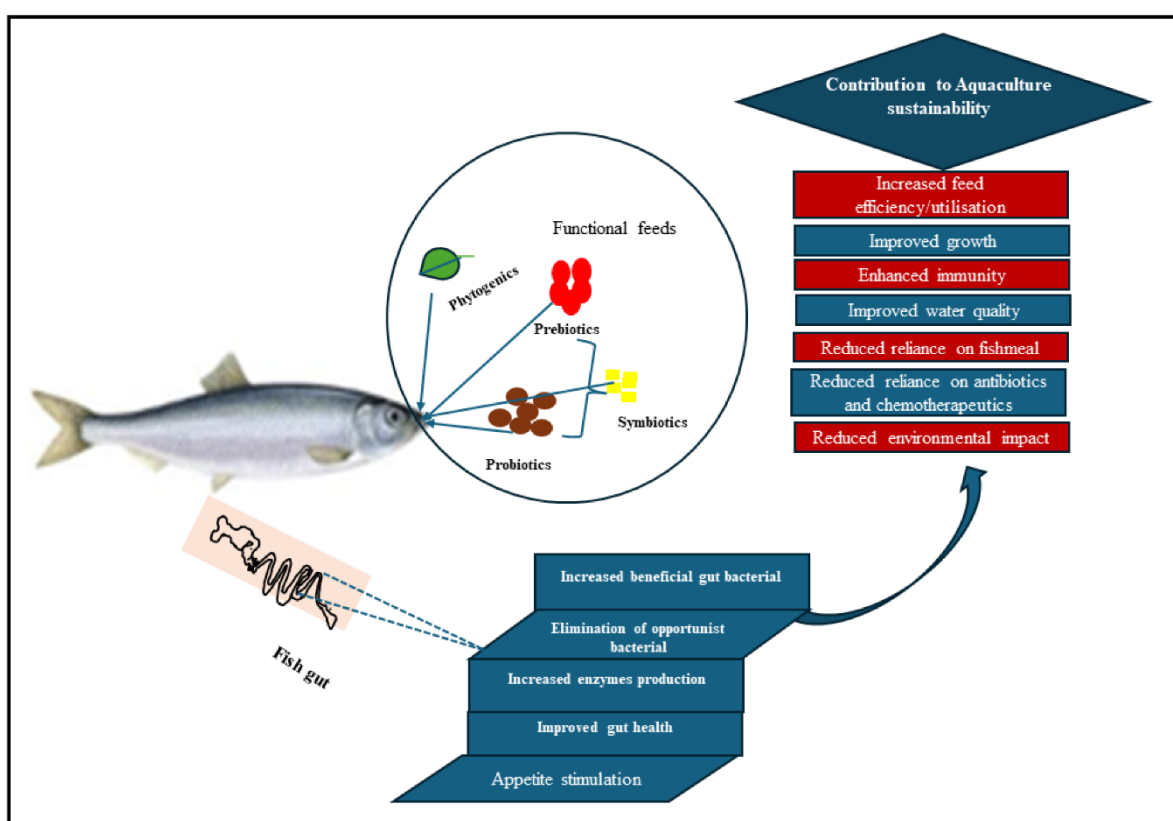
Kako bi se smanjila ovisnost o ribljem brašnu, alternativni izvori proteina kao što su brašno od kukaca, alge i biljni proteini postaju sve važniji. Ti sastojci smanjuju ekološki otisak smanjenjem pritiska na morske stokove i kopnene resurse. Sastojci hrane za životinje dobiveni iz otpada, kao što su nusproizvodi iz prerade hrane, dodatno poboljšavaju održivost minimiziranjem potrošnje resursa. Enzimski dodaci poboljšavaju apsorpciju hranjivih tvari, dok prebiotici i korisni mikroorganizmi podržavaju zdravlje crijeva i imunološki sustav te jačaju otpornost na stresore povezane s klimom (Messeder, 2021).



Slika 7. Uloge mikroalgi povezane s akvakulturom, Biorender.com (Wu i Hu, 2023)

Napredne tehnologije hranjenja

Optimizacija opskrbe hranom za životinje ključna je za održivost. Automatizirani sustavi hranjenja i sustavi praćenja u stvarnom vremenu omogućuju preciznu raspodjelu hrane, smanjenje otpada i poboljšanje pretvorbe hrane. Prilagođavanje učestalosti i količine hranjenja promjenjivom apetitu vrsta u toplijim vodama osigurava učinkovito korištenje resursa. Uključivanje minerala i vitamina u hranu povećava otpornost na stres, osobito u kiselim uvjetima, te promiče cjelokupno zdravlje i produktivnost (Zhang i sur., 2024).



Slika 8. Učinci funkcionalnih dodataka hrani za životinje u akvakulturi (prilagođeno iz Onomu & Okuthe, 2024)

Strategije za održivu akvakulturu

Za usklađivanje akvakulture sa ciljevima zaštite okoliša i održivosti ključne su sljedeće strategije:

- Alternativni izvori hrane: Povećana upotreba bjelančevina iz kukaca, algi i biljaka kako bi se smanjila ovisnost o ribljem brašnu.
- Optimizacija hrane: Upotreba enzima, prebiotika i puferskih tvari za poboljšanje probavljivosti i otpornosti.
- Tehnološka integracija: korištenje automatiziranih sustava hranjenja i alata za praćenje kako bi se smanjio otpad i povećala učinkovitost.

- Podrška politici: Promicanje propisa koji potiču održivu proizvodnju hrane za životinje i prakse s niskim udjelom ugljika.

Zaključak

Rast akvakulture ključan je za globalnu sigurnost hrane, ali njezin ekološki otisak, posebno kroz proizvodnju hrane za životinje, izazov je u svijetu koji se zagrijava. Korištenjem alternativnih sastojaka hrane za životinje, naprednih tehnologija i prilagođenih formulacija, industrija može smanjiti emisije, poboljšati otpornost vrsta i postići ciljeve održivosti. Suradnja između istraživača, proizvođača i kreatora politika ključna je kako bi se osiguralo da akvakultura zadovolji sve veću potražnju uz istodobno smanjenje njezina ekološkog utjecaja i doprinos zdravijem planetu.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Visoke emisije stakleničkih plinova povezane s proizvodnjom hrane za životinje
- Smanjena dostupnost i rastući troškovi ribljeg brašna i ribljeg ulja
- Povećani metabolički zahtjevi uzgojenih vrsta u uvjetima zagrijavanja
- Zakiseljavanje oceana narušava probavu hrane i unos hranjivih tvari

Preporuke:

- **Alternativa:** Uložiti u brašno od kukaca, alge, biljne bjelančevine i nusproizvode kako bi se smanjila ovisnost o ribljem brašnu.
- **Automatizirano hranjenje:** Uvesti tehnologije preciznog hranjenja kako bi se optimizirala upotrebu hrane za životinje i smanjio otpad.
- **Povećanje otpornosti:** Primijeniti funkcionalne aditive (enzime, prebiotike, probiotike, puferska sredstva) kako bi se poboljšala probavljivost i otpornost na stres.
- **Politika potpore:** Razviti poticaje i propise za održivu proizvodnju hrane za životinje i prakse s niskim emisijama ugljika.
- **Poticanje suradnje:** Uključivanje proizvođača, istraživača i kreatora politika kako bi se osigurali održivi izvori hrane za životinje.

Lista za provjeru:

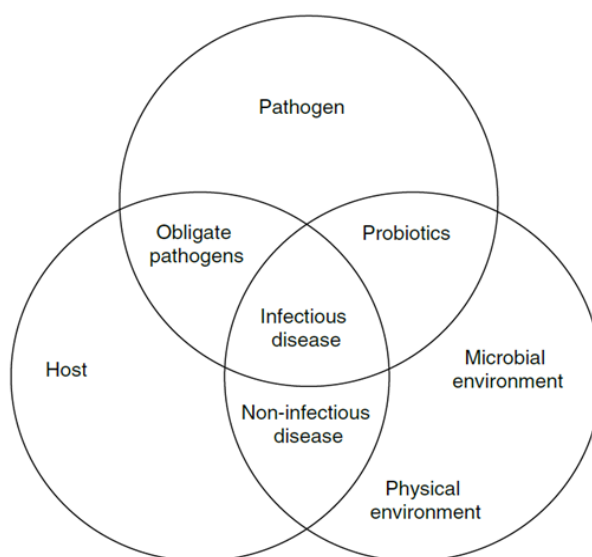
- Jesu li alternativni sastojci hrane za životinje (npr. kukci, alge, nusproizvodi) integrirani u lance opskrbe hranom za životinje?
- Primjenjuju li se automatizirani ili precizni sustavi hranjenja kako bi se smanjio otpad i optimizirala pretvorba hrane?

- Koriste li se funkcionalni aditivi za poboljšanje probavljivosti, zdravlja crijeva i otpornosti na stres u uvjetima zagrijavanja i zakiseljavanja?
- Postoje li politike podrške ili zajedničke inicijative za promicanje održive proizvodnje hrane za životinje i smanjenje ugljičnog otiska?

Učinci globalnog zatopljenja na bolesti u akvakulturi i zaštitne primjene

Uvod

Klimatske promjene imaju značajan utjecaj na vodene ekosustave i ugrožavaju sposobnost akvakulture da zadovolji globalnu potražnju za hranom, za koju se očekuje da će se do 2030. povećati za 30 milijuna tona (Lucas i sur., 2019.). Porast temperature, zakiseljavanje oceana, promjene saliniteta i ekstremni vremenski uvjeti pogoršavaju širenje bolesti, kvalitetu vode i opterećuju vrste u akvakulturi. Ovo poglavlje ispituje takve izazove i predlaže prilagodljive strategije upravljanja za poboljšanje otpornosti, s naglaskom na kontrolu bolesti, praćenje okoliša i održive prakse kako bi se osigurala održivost sektora.



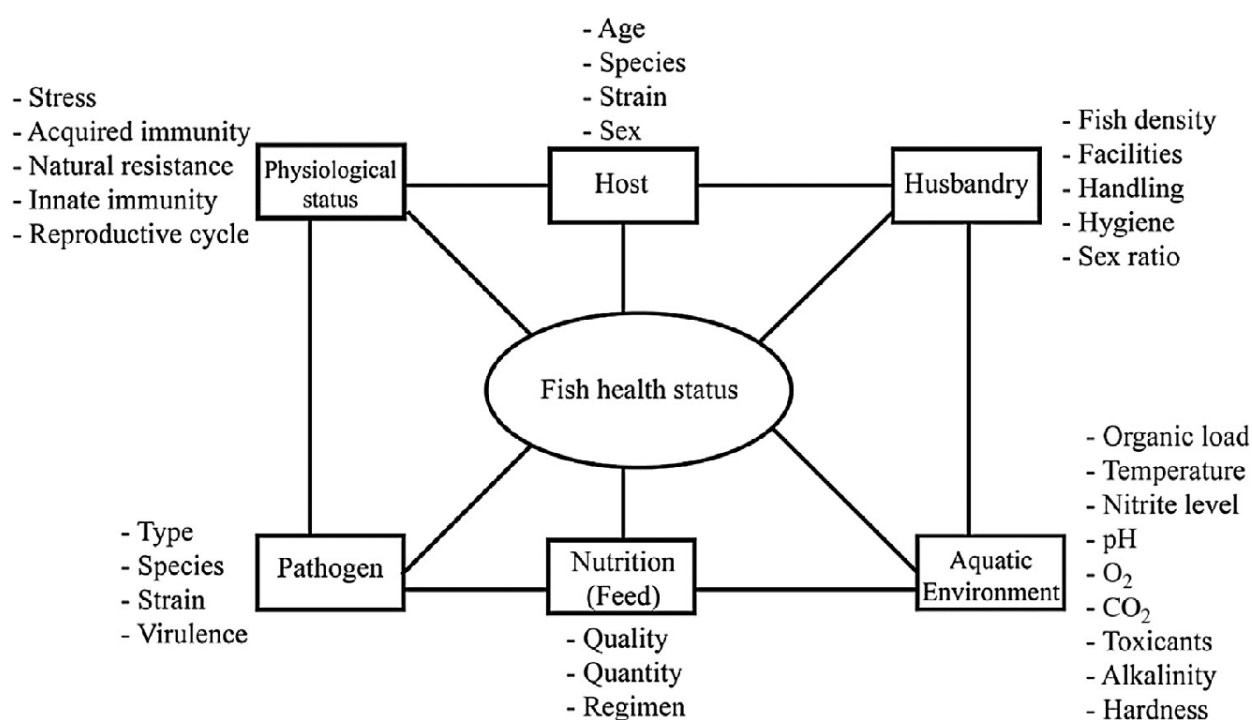
Slika 9. Modificirani Sneizkov model s tri prstena koji prikazuje interakciju između domaćina, patogena i okoliša (Lucas i sur., 2019)

Klimatske promjene u okolišu

Globalno zatopljenje mijenja vodeni okoliš kroz različite čimbenike stresa. Predviđa se da će površinske temperature oceana porasti za 0,6 do 2,0 °C do 2100., a razina mora porasti za 10 do 35 cm do 2050. zbog toplinskog širenja i otapanja leda (IPCC, 2022). Te promjene, u kombinaciji s povećanom apsorpcijom CO₂ (20 – 35 % emisija), dovest će do zakiseljavanja oceana, što će oslabiti kalcificirajuće organizme poput školjkaša i koralja (Lucas i sur., 2019). Promjene u oborinama i otjecanju dovode do fluktuacija saliniteta, dok opterećenje hranjivim tvarima potiče eutrofikaciju i štetno cvjetanje algi (HAB), stvarajući hipoksične uvjete koji pogoršavaju kvalitetu vode i pogoduju rastu patogena (Cheung i sur., 2023).

Učinci na zdravlje vrsta u akvakulturi

Povišene temperature vode ubrzavaju životni ciklus patogena i povećavaju prevalenciju i virulenciju bakterija, virusa i parazita (Woo i Iwama, 2019). Mnoge vrste u akvakulturi s uskim rasponom tolerancije na temperaturu pate od oslabljenog imunološkog sustava, smanjenog rasta i nižeg reproduktivnog uspjeha pod toplinskim stresom. Zakiseljavanje narušava stvaranje školjki školjkaša, dok promjene u salinitetu pokreću osmotski stres i povećavaju osjetljivost na bolesti. HAB-ovi pogoršani otjecanjem hranjivih tvari proizvode toksine koji štete ribama i stvaraju okruženje koje pogoduje izbijanju bolesti (Lucas i sur., 2019).



Slika 10. Čimbenici koji utječu na zdravstveno stanje riba (Jeney, 2017)

Izazovi bolesti i novi patogeni

Klimatske promjene povećavaju rizik od bolesti u akvakulturi, jer se tropski patogeni mogu naći u umjerenim područjima zbog toplije vode i može se povećati njihova otpornost na tretmane. Promjene u dinamici domaćina i parazita uvode nove vektore bolesti i kompliciraju upravljanje (Woo i Iwama, 2019). Oko 40% proizvodnje u akvakulturi izgubljeno je zbog bolesti, što je glavna prepreka zadovoljavanju globalne potražnje za hranom iz akvakulture (Lucas i sur., 2019). Povećani nadzor i prilagodljivo upravljanje bolestima ključni su za rješavanje ovih rastućih prijetnji.

Ranjivost infrastrukture i ekosustava

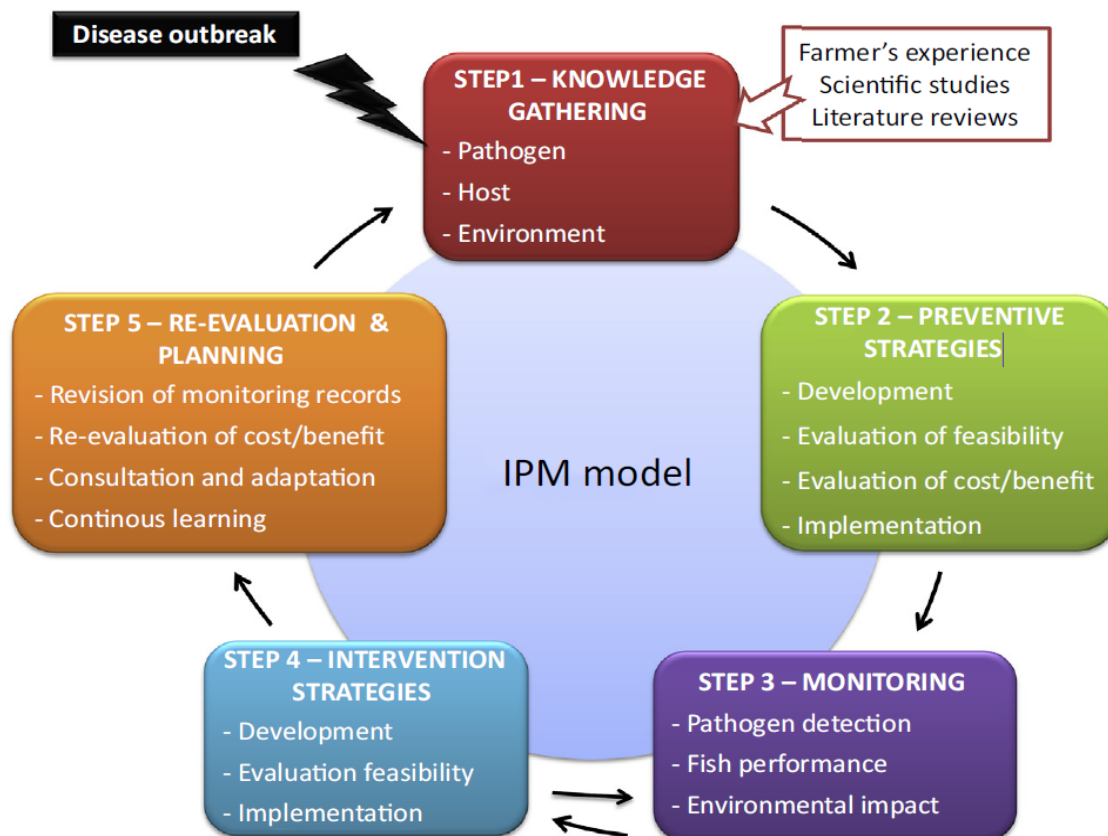
Ekstremni vremenski događaji kao što su oluje i poplave oštećuju akvakulturnu infrastrukturu kao što su obalni ribnjaci i kavezi za ribe, posebno u Aziji (Lucas i sur., 2019). Porast razine mora i obalna

erozija prijete krhkim ekosustavima kao što su koraljni grebeni i smanjuju dostupnost staništa za uzgojne vrste. Sve veća učestalost suša utječe na proizvodnju u ribnjacima, dok niži prinosi usjeva za sastojke hrane za životinje povećavaju troškove i stvaraju dodatni pritisak na industriju (Cheung i sur., 2023).

Adaptivne strategije upravljanja

Kako bi se ublažili učinci klimatskih promjena, akvakultura mora usvojiti niz strategija:

- Poboljšani nadzor bolesti: provesti praćenje patogena u stvarnom vremenu radi otkrivanja i kontrole novih bolesti.
- Upravljanje kvalitetom vode: upotreba sustava za prozračivanje i filtriranje za borbu protiv hipoksije i eutrofikacije.
- Otporna infrastruktura: razvoj kaveza i ribnjaka otpornih na oluje koji mogu izdržati ekstremne vremenske uvjete.
- Prilagodljive metode hranjenja: korištenje alternativnih sastojaka kao što su alge i brašno od kukaca za borbu protiv nestašice hrane i podršku zdravlju životinja u promjenjivim uvjetima.
- Kontrola okoliša: Podešavanje saliniteta i temperature putem kontroliranih sustava kako bi se smanjio stres na životinjama.



Slika 11. Proces razvoja strategija integriranog upravljanja patogenima (IPM) za bolesti riba (Jeney, 2017)

Zaključak

Klimatske promjene predstavljaju velike izazove za akvakulturu, od povećane bolesti i utjecaja na zdravlje vrsta do ranjivosti infrastrukture i degradacije ekosustava. Integracijom naprednog praćenja, otporne infrastrukture i održivih praksi hrane za životinje, industrija se može prilagoditi tim promjenama dok istovremeno zadovoljava globalnu potražnju za hranom. Suradnja između istraživača, proizvođača i kreatora politika ključna je za razvoj inovativnih rješenja kojima se osigurava održivost i otpornost akvakulture u klimi koja se mijenja.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Porast prevalencije i virulencije bolesti vodenih životinja u uvjetima zagrijavanja
- Stresori iz okoliša (zakiseljavanje, promjene saliniteta, eutrofikacija, štetno cvjetanje algi) koji slabe zdravlje vrsta
- Ranjivost akvakulturne infrastrukture na oluje, poplave i suše
- Opterećenje hranjivim tvarima i degradacija kvalitete vode pogoduju rastu patogena

Preporuke:

- **Pojačati nadzor:** Implementirati praćenje patogena u stvarnom vremenu i integrirati sustave upravljanja bolestima.
- **Kontrolno okruženje:** Koristiti prozračivanje, filtraciju i kontrolu kvalitete vode kako bi se smanjila hipoksija i eutrofikacija.
- **Izgraditi otpornost:** Razviti ribnjake, kaveze i prilagodljivu infrastrukturu otporne na oluje protiv ekstremnih vremenskih uvjeta.
- **Podržati zdravlje životinja:** Uključiti alternativnu hranu (kukci, alge, funkcionalni aditivi) kako bi se povećala otpornost na stres.
- **Usvojiti prilagodljivo upravljanje:** Kombinirati praćenje, planiranje za nepredviđene situacije i prakse temeljene na ekosustavu za dugoročnu otpornost.

Lista za provjeru:

- Jesu li sustavi nadzora i izvješćivanja o bolestima u stvarnom vremenu operativni?
- Primjenjuju li se prozračivanje, filtracija ili druge kontrole kvalitete vode kako bi se spriječila hipoksija i eutrofikacija?
- Je li akvakulturna infrastruktura dizajnirana ili nadograđena kako bi izdržala ekstremne vremenske uvjete?

- Koriste li se alternativna ili funkcionalna hrana za životinje za jačanje zdravlja vrsta pod klimatskim stresom?
- Jesu li uspostavljene adaptivne strategije upravljanja bolestima koje uključuju praćenje, planiranje djelovanja u nepredvidivim situacijama i zaštita ekosustava?

Odabir sustava za akvakulturu pod globalnim zatopljenjem

Uvod

Akvakultura, temelj globalne sigurnosti hrane, suočava se sa sve većim izazovima klimatskih promjena, uključujući porast temperature, zakiseljavanje oceana, promjene u salinitetu i širenje bolesti. Ovi stresori prijetu zdravlju vrsta, stabilnosti ekosustava i održivosti industrije. Ovo poglavlje ispituje inovativne akvakulturne recirkulacijske sustave (RAS), integriranu multitrofnu akvakulturu (IMTA) i off shore akvakulturu – kao otporna rješenja za ublažavanje klimatskih utjecaja. Također ispituje ulogu politike, sudjelovanja potrošača i istraživanja u promicanju održivih praksi kako bi se osigurala dugoročna održivost sektora (Boyd i sur., 2022).

Učinci klimatskih promjena na akvakulturu

Globalno zatopljenje utječe na vodene ekosustave na nekoliko načina. Porast temperature vode povećava metaboličke zahtjeve, narušava imunološku obranu i smanjuje rast i razmnožavanje životinja iz uzgoja (Boyd i McNevin, 2015). Zakiseljavanje oceana uzrokovano povećanim razinama CO₂ ometa stvaranje ljuske u kalcificirajućim organizmima kao što su školjkaši, ugrožavajući njihov opstanak i ekonomsku održivost (Cooley i sur., 2009). Fluktuacije saliniteta uzrokovane promjenom oborina i otapanjem leda narušavaju distribuciju vrsta, dok otjecanje hranjivih tvari potiče štetno cvjetanje algi (HAB) i hipoksiju te pogoršava kvalitetu vode (Diaz i Rosenberg, 2008). Ove promjene naglašavaju potrebu za prilagodljivim sustavima u akvakulturi.

Širenje bolesti u toplijim vodama

Toplije vode ubrzavaju životne cikluse patogena i povećavaju učestalost i težinu izbijanja bolesti. Na primjer, *Vibrio* spp. uspijeva na povišenim temperaturama i uzrokuje značajne gubitke u akvakulturi (Bondad-Reantaso i sur., 2005). Čimbenici stresa povezani s klimom, kao što su hipoksija i zakiseljavanje, dodatno slabe imunološki sustav vrste i povećavaju osjetljivost na infekcije (Holmer, 2010). Učinkovito upravljanje bolestima zahtijeva napredni nadzor i otporne sustave za ublažavanje ovih povećanih rizika.

Inovativni sustavi u akvakulturi

Kako bi se odgovorilo na klimatske izazove, otpornost i održivost karakteriziraju tri sustava:

- **Akvakulturni recirkulacijski sustavi (RAS):** Ovi zatvoreni sustavi pružaju preciznu kontrolu temperature, saliniteta i kvalitete vode, smanjuju ovisnost o vanjskim izvorima vode i štite vrste od klimatske varijabilnosti (Martins i sur., 2010).
- **Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA):** Uzgojem komplementarnih vrsta IMTA poboljšava kruženje hranjivih tvari i stabilnost ekosustava, smanjuje utjecaj na okoliš i poboljšava učinkovitost resursa (Handisyde i sur., 2017).
- **Offshore akvakultura:** Djelovanjem u dubljim, stabilnijim vodama offshore sustavi smanjuju izloženost obalnim stresorima kao što su eutrofikacija i HAB-ovi te pružaju prilagodljivo rješenje za održivu proizvodnju (Pereira i sur., 2024).

Politika i financijska potpora

Za prelazak na otporne sustave potrebni su čvrsti okviri politike i financijski poticaji. Vlade i međunarodne organizacije mogu poduprijeti tranziciju subvencijama, poreznim olakšicama i bespovratnim sredstvima, posebno za male uzgajivače koji su osjetljivi na klimatske šokove. Međunarodni sporazumi i platforme za razmjenu znanja mogu olakšati prijenos tehnologije i najbolje prakse te osigurati pravedan pristup rješenjima otpornima na klimatske promjene (Froehlich i sur., 2018).

Angažman potrošača i tržišni poticaji

Potražnja potrošača za održivim proizvodima pokreće promjene u industriji. Programi certificiranja i ekološke oznake potiču proizvođače na usvajanje održivih praksi, dok sljedivost putem lanca blokova povećava transparentnost i povjerenje (Boyd i sur., 2022). Obrazovne kampanje mogu podići svijest i potaknuti pomak tržišta prema okolišno održivim proizvodima, posebno u regijama akvakulture s velikim potencijalom.

Istraživanje i razvoj

Ulaganje u istraživanje ključno je za poboljšanje otpornih sustava. Ključna područja uključuju:

- Poboljšanje energetske učinkovitosti RAS-a radi smanjenja operativnih troškova.
- Razvoj pristupačnih IMTA modela za širu primjenu.
- Daljnji razvoj strategija otkrivanja i kontrole patogena za borbu protiv širenja bolesti.
- Dugoročno praćenje okoliša radi prilagodbe promjenjivim klimatskim uvjetima.

Zaključak

Klimatske promjene predstavljaju znatnu prijetnju akvakulturi, od toplinskog stresa i izbijanja bolesti do zakiseljavanja i degradacije staništa. Otporni sustavi, kao što su RAS, IMTA i offshore

akvakultura, nude inovativna rješenja za poboljšanje održivosti i produktivnosti. Uz snažnu politiku, angažman potrošača i ciljana istraživanja, ti sustavi mogu osigurati ulogu akvakulture u globalnoj sigurnosti opskrbe hranom uz istodobno ublažavanje utjecaja na okoliš. Suradnja među dionicima ključna je za izgradnju budućnosti industrije otporne na klimatske promjene.

Ključne preporuke i kontrolni popis

Izazovi:

- Porast temperature vode i fluktuacije saliniteta koji opterećuju uzgojene vrste
- Sve češća pojava ekstremnih vremenskih uvjeta koji štete infrastrukturi
- Onečišćenje otpadom i hranjivim tvarima koje utječu na ekosustave i produktivnost gospodarstava
- Ograničena skalabilnost i visoki troškovi održivih sustava

Preporuke:

- **Usvojiti RAS:** Implementirati recirkulacijske sustave u akvakulturi za kontrolu kvalitete vode, smanjenje otpada i poboljšanje biološke sigurnosti.
- **Proširiti IMTA:** Uvesti integriranu multitrofnu akvakulturu za recikliranje hranjivih tvari i smanjenje utjecaja na okoliš.
- **Razviti offshore uzgoj:** Uvesti offshore sustave u dubljim vodama kako bi se prilagodili obalnim klimatskim stresorima.
- **Ojačati infrastrukturu:** Uložiti u otporne kaveze i ribnjake otporne na oluje kako bi se izdržali ekstremni vremenski uvjeti.
- **Omogućiti upravljanje:** Promovirati politike podrške, financijske poticaje i suradnju dionika za usvajanje sustava.

Lista za provjeru:

- Upotrebljavaju li se akvakulturni recirkulacijski sustavi (RAS) za upravljanje kvalitetom vode i smanjenje otpada?
- Primjenjuju li se prakse integrirane multitrofičke akvakulture (IMTA) za recikliranje hranjivih tvari i stabilizaciju ekosustava?
- Razmatraju li se mogućnosti offshore akvakulture kako bi se smanjila osjetljivost na obalne klimatske stresore?
- Je li akvakulturna infrastruktura projektirana ili nadograđena kako bi izdržala ekstremne vremenske uvjete?
- Jesu li uspostavljeni mehanizmi politike i financijske potpore kako bi se olakšalo usvajanje održivih sustava?

Reference

- 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.
- Betsy, C. J., C. S., & Sampath Kumar, J. S. (2022). Cryopreservation and its application in aquaculture. In *Cryopreservation and Its Application in Aquaculture*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99629>
- 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
- Bujas, T., Korićan, 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.
- Coolley, S. R., et al. (2009). Ocean acidification's potential to alter global seafood supply. *Oceanography*, 22(4), 172–181.
- 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>
- Dalsgaard, T., & Krause-Jensen, D. (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture*, 256, 302–310.
- 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>
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929.
- Durant, J. M., et al. (2007). "Trophic Match-Mismatch and Climate Change." *Ecology*.
- Fletcher, G. L., & Rise, M. L. (Eds.). (2012). *Aquaculture biotechnology*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- 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.
- 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>
- 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.
- 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.
- Houston, R. D., et al. (2018). "Selective breeding for disease resistance in aquaculture species: challenges and progress." *Fisheries Research*.
- Lucas, J. S., Southgate, P. C., & Tucker, C. S. (2019). *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants*. John Wiley & Sons.
- 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.
- 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>
- Messeder, T. (2021). *Innovation opportunities in European Aquaculture*. KTN AgriFood and EIT Food. March 2021.
- 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>
- 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.
- 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>

- 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>
- 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.
- Sankaran, G. B., & Mandal, A. (2024). Genetic improvements in aquaculture. *The Trout Journal of Atatürk University*, 2(1–2), 16–25. <https://doi.org/10.62425/tjau.1570599>
- Tompkins, E. M., et al. (2017). "Effects of Warming on Fish Breeding Patterns." *Global Change Biology*.
- Woo, P. T., & Iwama, G. K. (eds.). (2019). *Climate change and non-infectious fish disorders*. CABI.
- 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.
- Yang, Z., Yu, Y., Tay, Y. X., & Yue, G. H. (2021). Genome editing and its applications in genetic improvement in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 00(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/raq.12591>
- 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>
- 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>

Ključne preporuke za akvakulturu otpornu na klimatske promjene

Ovaj odjeljak ukratko prikazuje ključne preporuke iz svih poglavlja kako bi se dionicima predstavile mogućnosti prilagodbe akvakulture na klimatske promjene:

- **Pratiti kvalitetu vode**
 - Pratiti temperaturu, kisik, salinitet i hranjive tvari pomoću sustava u stvarnom vremenu.
- **Smanjiti otpad i zagađenje**
 - smanjiti otjecanje hranjivih tvari, upravljati otpadnim vodama i spriječiti eutrofikaciju.
- **Zaštititi vodene ekosustave**
 - očuvati staništa (mangrove, močvare) i biološku raznolikost.
- **Usvojiti održivu hranu za životinje**
 - Koristiti brašno od kukaca, alge, nusproizvode i funkcionalne aditive.
- **Povećati otpornost vrsta**
 - primijeniti selektivni uzgoj, genomske alate, krioprezervaciju.
- **Osigurati etičku biotehnologiju**
 - regulirati CRISPR-Cas9, dati prednost dobrobiti životinja i biološkoj sigurnosti.
- **Implementirati napredne sustave**
 - proširiti RAS, IMTA i offshore akvakulturu.
- **Izgraditi otpornu infrastrukturu**
 - kavezi, ribnjaci i objekti otporni na klimatske promjene.
- **Promicati suradnju i podršku politikama**
 - omogućiti financijske poticaje, certificiranje i suradnju dionika.

Monitor Water Quality

temperature, oxygen,
salinity, nutrients



Reduce Waste & Emissions

nutrient runoff,
pollution, energy use



Protect Ecosystems

habitats, biodiversity,
wetlands, mangroves



Adopt Sustainable Feeds

insect meal, algae,
by-products



Enhance Species Resilience

selective breeding,
cryopreservation



Ensure Ethical Biotechnology

safe CRISPR use,
animal welfare



Implement Advanced Systems

RAS, IMTA, offshore
farming



Build Resilient Infrastructure

storm-proof cages,
climate-proof ponds



Promote Policy & Collaboration

incentives, certification,
stakeholder action



Slika 12. Vizualni pregled ključnih preporuka za akvakulturu otpornu na klimatske promjene