



Funded by
the European Union



Digitalni plavi nositelj za budućnost nakon ugljika - inovacije kurikulumu u akvakulturi [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Modul 1. Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode i utjecaj na akvakulturu

Assoc. prof. Dr. 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. Učinci globalnog zatopljenja na kvalitetu vode

1.1. Toplinska stratifikacija i iscrpljivanje kisika u vodenim ekosustavima

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.).

1.2. Porast temperature, metaboličke i promjene rasta

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 mriješta, 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.).

1.3. Zakiseljavanje oceana

Razine pH i zakiseljavanje oceana

Apsorpcija ugljičnog dioksida (CO₂) 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 CO₂ 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.).

Utjecaji na morski život

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 školjakaša 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 izgleđi za budućnost

Rješavanje problema zakiseljavanja oceana zahtijeva koordinirane globalne napore za smanjenje emisija CO₂ i provedbu prilagodljivih strategija. Obnova livada morske trave i mangrova može poboljšati otpornost obale apsorpcijom CO₂ 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 školjakaša (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.).

1.4. Promjene u salinitetu

Mehanizmi koji pokreću promjene saliniteta

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 organizme i organizme estuarija

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).

1.5. Promjene u utjecaju saliniteta oceana na rasprostranjenost morskih vrsta

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 zaslanjivanje, 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 budući 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 sustavi akvakulture (RAS) i selektivni uzgoj vrsta otpornih na sol. Pobojšani 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.).

1.6. Opterećenje hranjivim tvarima i eutrofikacija

Mehanizmi opterećenja hranjivim tvarima i eutrofikacije

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.).

Učinci 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 ugibanjem 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.).

1.7. Suše, nestašica i pogoršana kvaliteta vode

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 energetski intenzivne i ekološki oporezujuće (Moussa i sur., 2025.).

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 prijeti 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

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 škampa 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

Toplije temperature vode ubrzavaju životne cikluse patogena i parazita, što dovodi do češćih i ozbiljnijih izbijanja. Na primjer, bolesti uzrokovane *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 škampa 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 sustavi akvakulture (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.).

2.1. Ekonomske posljedice utjecaja globalnog zatopljenja na akvakulturu

Smanjeni prinosi morskih plodova i ribe

Globalno zatopljenje narušava ravnotežu vodenih ekosustava, izravno utječući na populacije riba i školjkaša. 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 školjkaša, s kaskadnim učincima na profitabilnost akvakulture (Doney i sur., 2009.).

Kombinirani učinci zagrijavanja i zakiseljavanja značajno narušavaju procese kalcifikacije kod školjkaša, kao što su kamenice i školjke. Smanjene razine pH ometaju njihov rast i preživljavanje, ugrožavajući njihovu dostupnost za akvakulturu. Studije su pokazale da su kalcificirajući organizmi



posebno osjetljivi na smanjenje koncentracije karbonatnih iona uzrokovane povećanim atmosferskim CO₂ (Nienhuis i sur., 2010). Kao rezultat toga, subjekti 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. Objekti akvakulture moraju uključivati 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 subjekata 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 škampa 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.).

2.2. Utjecaj globalnog zatopljenja na geografske promjene u akvakulturi

Zona premještanja: premještanje odgovarajućih 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 operatera akvakulture da implementiraju skupe strategije 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 škampa 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 pasmina 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 akvakulture.

Invazivne vrste također narušavaju prirodnu ravnotežu ekosustava, što dovodi do gubitka biološke raznolikosti. Na primjer, invazivne alge mogu formirati guste prostirke 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.

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 (Zarzyczny 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.). Akvakultura na moru, 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.csee.2024.100621>
- Burke, M., Grant, J., Filgueira, R., & Swanson, A. (2022). Oxygenation effects on temperature and dissolved oxygen at a commercial Atlantic salmon farm. *Aquacultural Engineering*, 99, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102287>
- Day, J. W., Rybczyk, J. M., & Stephens, J. R. (2024). Climate change effects on nutrient loading and coastal eutrophication. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 6(18), 627–637. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00112-8>
- DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3), 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>
- Deutsch, C., Penn, J. L., & Seibel, B. A. (2020). Climate change constrains fish metabolic scope and habitat suitability globally. *Science Advances*, 6(22), eaax0194. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0194>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- 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. Retrieved from <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>
- 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>
- Zarzychny, 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>



Funded by
the European Union



Digitalni plavi nositelj za budućnost nakon ugljika - inovacije kurikulumu u akvakulturi [DiBluCa]"

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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>

Tablica 1. Naslov tablice

Stupac 1.	Stupac 2.	Stupac 3.	Stupac 4.
Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka
Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka
Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka
Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka
Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka	Tekstualna poruka