



# Poglavlje 6: Odabir sustava protiv globalnog zatopljenja u akvakulturi

izv. prof. dr. sc. Dimitris Klaoudatos

Sveučilište u Tesaliji (UTH)

## 1. Uvod

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

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

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

Zakiseljavanje oceana, izravna posljedica povećanih razina ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u atmosferi, predstavlja još jedan kritičan izazov. Zakiseljene vode smanjuju dostupnost karbonatnih iona potrebnih školjkama i drugim kalcificirajućim organizmima da izgrade svoje školjke i kosture. Studije Cooley i sur., (2009) ističu ekonomske i ekološke rizike povezane sa zakiseljavanjem, posebno za industriju školjkaša. Osim toga, promjene u salinitetu uzrokovane otapanjem ledenih kapa i promijenjenim obrascima oborina narušavaju geografsku rasprostranjenost vrsta akvakulture, što zahtijeva operacije da se prilagode tim dinamičkim uvjetima (Troell i sur., 2003.).



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

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

## **2. Utjecaj globalnog zatopljenja na sustave u akvakulturi**

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

### **2.1 Toplinski stres**

Globalno povećanje temperature predstavlja izazov za sustave akvakulture, posebno za vrste s uskim toplinskim tolerancijama. Na primjer, studije pokazuju da porast temperature vode dovodi do veće stope metabolizma kod riba, povećavajući potražnju za kisikom i stres (Boyd i McNevin, 2015).

Rastuće globalne temperature predstavljaju značajne izazove za operacije akvakulture, posebno za vrste s uskim toplinskim tolerancijama. Ribe, školjkaši i drugi vodeni organizmi često imaju ograničen raspon optimalnih temperatura potrebnih za njihove fiziološke funkcije. Povišene temperature povećavaju brzinu metabolizma, što rezultira povećanom potrebom za kisikom i fiziološkim stresom (Boyd i McNevin, 2015). S porastom temperature vode, dostupnost kisika smanjuje se zbog smanjene topljivosti, stvarajući uvjete hipoksije izazvane temperaturom. Ovaj fenomen pogoršava stopu smrtnosti kod vrsta poput lososa i tilapije, posebno u slojevitim vodenim tijelima gdje razina kisika već varira.

### **2.2 Eutrofikacija i hipoksija**



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

## 2.3 Proliferacija bolesti

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

## 2.4 Zakiseljavanje oceana

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

## 2.5 Promjene u salinitetu

Otapanje ledenih kapa i promjena obrasca oborina mijenjaju razinu saliniteta u morskom i estuarskom okolišu, utječući na distribuciju i produktivnost vrsta akvakulture. Vrste poput kozica i brancina, koje su osjetljive na fluktuacije saliniteta, mogu doživjeti smanjen rast i razmnožavanje (Troell i sur., 2003.). U Bangladešu je porast razine saliniteta u obalnim vodama prisilio farme kozica da se prilagode uvođenjem vrsta otpornih na sol, ali te promjene dolaze sa značajnim ekonomskim i ekološkim troškovima.

## 3. Ključni kriteriji za odabir sustava

Odabir sustava akvakulture koji mogu izdržati negativne učinke klimatskih promjena ključan je za održivost. Ključni kriteriji uključuju otpornost na temperaturne fluktuacije, ublažavanje eutrofikacije,



kontrolu patogena, energetske učinkovitost i prilagodljivost promjenama saliniteta. Sustavi kao što su recirkulacijski sustavi akvakulture (RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA) učinkovito rješavaju ove izazove nudeći kontrolu okoliša i kruženje hranjivih tvari (Martins i sur., 2010.; Pereira i sur., 2024). Tim se kriterijima osigurava prilagodljivost sustava akvakulture klimatskim uvjetima koji se mijenjaju.

### **3.1 Otpornost na temperaturne fluktuacije**

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

### **3.2 Ublažavanje eutrofikacije**

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

### **3.3 Kontrola patogena**

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

### **3.4. Energetska učinkovitost i smanjenje ugljičnog otiska**



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

Inovativna energetska rješenja, kao što su sustavi za proizvodnju energije iz otpada koji pretvaraju organski otpad iz akvakulture u bioplin, dodatno poboljšavaju održivost rješavanjem izazova gospodarenja otpadom (Martins i sur., 2010.). Sustavi akvakulture na solarni pogon u regijama s ograničenim resursima, kao što je subsaharska Afrika, pokazuju kako energetski učinkovita rješenja mogu potaknuti ekološku i gospodarsku održivost. Korištenjem obnovljive energije i učinkovitih tehnologija prozračivanja, industrija akvakulture može značajno smanjiti svoj utjecaj na okoliš uz promicanje dugoročne otpornosti i produktivnosti (Badiola i sur., 2012.).

### **3.5 Prilagodljivost fluktuacijama saliniteta**

Sustavi smješteni u obalnim i estuarskim regijama moraju uzeti u obzir promjene saliniteta uzrokovane globalnim zatopljenjem. Eurihaline vrste, sposobne tolerirati širok spektar saliniteta, mogu biti prioritet. Programi selektivnog uzgoja često se koriste za razvoj vrsta s povećanom tolerancijom na salinitet (Rahman i sur., 2021.). Primjer su operacije akvakulture u Bangladešu prilagođene prodorima saliniteta uzgojem vrsta otpornih na sol kao što je tilapija.

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

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



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

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

Ekonomska održivost i skalabilnost naprednih sustava akvakulture ključne su za osiguravanje širokog usvajanja. Iako sustavi poput RAS-a i IMTA-e nude dugoročne prednosti, njihovi visoki početni troškovi mogu odvratiti male i srednje operatere. Mehanizmi podjele troškova, kao što su javno-privatna partnerstva i državne subvencije, mogu riješiti financijske prepreke. Osim toga, ekonomski razmjeri postignuti većim operacijama ili zadružnim modelima mogu smanjiti troškove po jedinici. Studije pokazuju da je skaliranje IMTA sustava u Kanadi povećalo učinkovitost proizvodnje za 25%, a istovremeno značajno poboljšalo ekološke ishode (Baltadakis, 2021.). Inovacije u modularnim sustavima akvakulture, koje omogućuju postupno širenje, pružaju fleksibilna i isplativa rješenja za nove sudionike u industriji.

## **4. Inovativni sustavi za rješavanje klimatskih izazova**

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

### **4.1 Akvakultura na moru**

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

### **4.2. Recirkulacijski sustavi akvakulture (RAS)**





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

### 4.3 Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA)

IMTA povećava ekološku otpornost integracijom vrsta s komplementarnim funkcijama, kao što su ribe, školjkaši i morske alge (Pereira i sur., 2024.). Integrirana multitrofička akvakultura (IMTA) inovativan je sustav koji uključuje više vrsta s različitih trofičkih razina u jednu poljoprivrednu operaciju. Ovaj sustav koristi prirodne ekološke odnose među vrstama kako bi poboljšao kruženje hranjivih tvari i smanjio utjecaj na okoliš. Na primjer, morske alge i školjkaši mogu apsorbirati višak hranjivih tvari nastalih proizvodnjom riba, ublažavajući eutrofikaciju i poboljšavajući kvalitetu vode (Pereira i sur., 2024.). U Kanadi su IMTA sustavi koji uključuju atlantskog lososa (*Salmo salar*), dagnje (*Mytilus edulis*) i alge (*Saccharina latissima*) pokazali ekološke i ekonomske koristi, uključujući povećanu proizvodnju biomase i smanjeno opterećenje hranjivim tvarima u okolnim vodama (Troell i sur., 2003.).

### 4.4 Akvakultura morskih algi

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

### 4.5 Pametne tehnologije akvakulture

Integracija digitalnih tehnologija, kao što su umjetna inteligencija (AI), Internet (IoT) i daljinsko istraživanje, revolucionirala je operacije akvakulture. Pametni sustavi omogućuju praćenje okolišnih parametara u stvarnom vremenu, kao što su temperatura, salinitet i otopljeni kisik, omogućujući uzgajivačima da proaktivno reagiraju na promjenjive uvjete (Føre i sur., 2018.). Na primjer, automatizirani sustavi hranjenja i zdravstvena dijagnostika vođena umjetnom inteligencijom



povećavaju operativnu učinkovitost uz smanjenje otpada. Ove inovacije podupiru održivost i skalabilnost sustava akvakulture pod pritiskom klimatskih promjena.

## **5. Politika i ekonomska razmatranja**

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

### **5.1 Regulatorna podrška**

Vlade imaju ključnu ulogu u poticanju sustava akvakulture otpornih na klimatske promjene. Politike bi trebale dati prednost poticajima za usvajanje održivih tehnologija kao što su reciklacijski sustavi akvakulture (RAS) i integrirana multitrofična akvakultura (IMTA). Na primjer, zajedničkom ribarstvenom politikom Europske unije (ZRP) promiče se održiva akvakultura integracijom strategija prilagodbe klimatskim promjenama (FAO, 2020.). Subvencije, porezne olakšice i bespovratna sredstva mogu dodatno potaknuti ulaganja u inovativne sustave. Osim toga, regulatorni okviri moraju se baviti pitanjima kao što su učinkovitost korištenja vode, gospodarenje otpadom i kontrola bolesti kako bi se prakse akvakulture uskladile s ciljevima ekološke održivosti (OECD, 2021.).

### **5.2 Ekonomska izvedivost**

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

### **5.3 Međunarodna suradnja**

Utjecaji klimatskih promjena nadilaze nacionalne granice, što zahtijeva međunarodnu suradnju. Suradničke istraživačke inicijative, kao što su one u okviru programa Obzor Europa, usmjerene su na





razvoj tehnologija akvakulture otpornih na klimatske promjene i razmjenu najboljih praksi među dionicima (Europska služba za vanjsko djelovanje (2021.)). Štoviše, međunarodne organizacije poput Organizacije za hranu i poljoprivredu (FAO) pružaju tehničku podršku i preporuke politike za jačanje globalne otpornosti akvakulture (FAO, 2024.). Regionalni savezi, kao što je Azijsko-pacifička komisija za ribarstvo (APFIC), također olakšavaju prijenos znanja i udruživanje resursa, omogućujući zemljama da usvoje prilagođena rješenja za svoje jedinstvene izazove (APFIC, 2019.). Globalna partnerstva mogu olakšati razmjenu znanja i financiranje istraživanja praksi akvakulture otpornih na klimatske promjene (Tett i sur., 2011.).

#### **5.4 Dinamika tržišta i svijest potrošača**

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

#### **5.5 Mehanizmi za ublažavanje rizika i osiguranje**

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

## **6. Zaključak**



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

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

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

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

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

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

## 7. Literatura

Abolofia, J., Asche, F., & Wilen, J. E. (2017). The cost of lice: quantifying the impacts of parasitic sea lice on farmed salmon. *Marine Resource Economics*, 32(3), 329-349.

- Allison, E. H., Perry, A. L., Badjeck, M. C., Neil Adger, W., Brown, K., Conway, D., ... & Dulvy, N. K. (2009). Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and fisheries*, 10(2), 173-196.
- Aly, S. M., & Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: a scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763-8789.
- Asia-Pacific Fishery Commission. (2014). Regional Overview of Aquaculture Trends in the Asia-Pacific Region. Food and Agriculture Organization of the United Nations regional office for Asia and the Pacific, Bangkok,ailand.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Baltadakis, A. (2021). Investigating Integrated Multi-Trophic Aquaculture at different spatial sales.
- Bank, W. (2013). Fish to 2030 Prospects for Fisheries and Aquaculture World Bank Report Number 83177-GLB. Washington, DC.
- Bondad-Reantaso, M. G., et al. (2005). Disease and health management in Asian aquaculture. *Veterinary Parasitology*, 132(3-4), 249-272.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). Aquaculture, resource use, and the environment. *John Wiley & Sons*.
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., ... & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578-633.
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... & Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture?. *Science*, 341(6150), 1067-1068.
- Cooley, S. R., et al. (2009). Ocean acidification's potential to alter global seafood supply. *Oceanography*, 22(4), 172-181.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- European External Action Service (2021). Horizon Europe strategic plan 2021–2024. European Union. [https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon\\_europe\\_strategic\\_plan\\_2021-2024.pdf](https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon_europe_strategic_plan_2021-2024.pdf)
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>

- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., ... & Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *biosystems engineering*, 173, 176-193.
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R., & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature ecology & evolution*, 2(11), 1745-1750.
- Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M., & Halpern, B. S. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29(18), 3087-3093.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture. Final Technical Report, DFID, Stirling. 151pp.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: Perspectives, concerns, and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- Manolache, A. I., & Andrei, G. (2024). A Comprehensive Review of Multi-Use Platforms for Renewable Energy and Aquaculture Integration. *Energies*, 17(19), 4816.
- Martins, C. I., et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93.
- Munday, P. L., Dixon, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Døving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1848-1852.
- Nielsen, R., Ankamah-Yeboah, I., & Llorente, I. (2021). Technical efficiency and environmental impact of seabream and seabass farms. *Aquaculture Economics & Management*, 25(1), 106-125.
- OECD (2021), Strengthening Climate Resilience: Guidance for Governments and Development Co-operation, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4b08b7be-en>.
- Pereira, R., Yarish, C., & Critchley, A. T. (2024). Seaweed aquaculture for human foods in land based and IMTA systems. In *Applications of Seaweeds in Food and Nutrition* (pp. 77-99). Elsevier.
- Potts, J., Wilkings, A., Lynch, M., & McFatridge, S. (2021). State of Sustainability Initiatives Review: Standards and the Blue Economy. International Institute for Sustainable Development.
- Pounds, J. A., et al. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167.
- Probst, W. N. (2020). How emerging data technologies can increase trust and transparency in fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1286-1294.
- Rahman, M. L., Shahjahan, M., & Ahmed, N. (2021). Tilapia farming in Bangladesh: Adaptation to climate change. *Sustainability*, 13(14), 7657.

- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper, (589), I.
- Tett, P., et al. (2011). Defining and detecting undesirable disturbance in the context of marine eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 1147-1155.
- Tine, M., Kuhl, H., Gagnaire, P. A., Louro, B., Desmarais, E., Martins, R. S., ... & Reinhardt, R. (2014). European sea bass genome and its variation provide insights into adaptation to euryhalinity and speciation. *Nature communications*, 5(1), 5770.
- Troell, M., et al. (2003). Integrated mariculture: Asking the right questions. *Aquaculture*, 226(1-4), 69-90.
- Yue, G. H., Ma, K. Y., & Xia, J. H. (2024). Status of conventional and molecular breeding of salinity-tolerant tilapia. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 271-286.
- Van Anrooy, R., Espinoza Córdova, F., Japp, D., Valderrama, D., Gopal Karmakar, K., Lengyel, P., ... & Zhang, Z. (2022). World review of capture fisheries and aquaculture insurance 2022 (Vol. 682). Food & Agriculture Org..
- Visch, W., Layton, C., Hurd, C. L., Macleod, C., & Wright, J. T. (2023). A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture—A case study from southern Australia. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1467-1479.