

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

**prof. dr. sc. Vlasta Bartulović**

**izv. prof. dr. sc. Tatjana Dobroslavić**

**Sveučilište u Dubrovniku**

## Uvod

Suočeni s klimatskim promjenama, utjecaj akvakulture na okoliš sve je veći problem jer industrija doprinosi emisijama stakleničkih plinova, uništavanju staništa i iscrpljivanju resursa. Emisije stakleničkih plinova, uključujući ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), dušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) i fluorirane plinove, značajno doprinose globalnom zatopljenju zadržavanjem topline u Zemljinoj atmosferi. Dok  $\text{CO}_2$  često zauzima središnje mjesto,  $\text{CH}_4$  je vrlo snažan staklenički plin čije su povećane emisije uzrokovane ljudskim aktivnostima kao što su krčenje šuma, rudarstvo, sagorijevanje biomase i industrijski procesi (Wróbel i sur., 2023.). Međuvladin panel o klimatskim promjenama (IPCC) naglasio je da je ljudski utjecaj na klimatske promjene neosporan, a industrijalizacija i urbanizacija dovode do rekordnih emisija stakleničkih plinova. Prometni, energetske i poljoprivredni sektori i dalje znatno doprinose klimatskim promjenama, utječući na vremenske obrasce, razinu mora i biološku raznolikost.

Iako je globalna industrija akvakulture ključna za sigurnost hrane, ona je i značajan izvor emisija stakleničkih plinova. Energetske intenzivne operacije, prenamjena zemljišta, proizvodnja hrane za životinje i gospodarenje otpadom pridonose ugljičnom otisku (MacLeod i sur., 2019.). Mnogi objekti akvakulture oslanjaju se na električnu energiju iz fosilnih goriva, što povećava emisije  $\text{CO}_2$ , posebno u regijama u kojima ugljen, nafta i prirodni plin dominiraju proizvodnjom energije (Bujas i sur., 2022.). Osim toga, brzo širenje industrije dovelo je do prenamjene staništa, posebno u ekološki osjetljivim područjima kao što su mangrove i močvare, što je pridonijelo gubitku biološke raznolikosti i degradaciji ekosustava (Barbier i sur., 2011.).

Jedan od najvećih učinaka akvakulture na okoliš je proizvodnja hrane za životinje, koja čini do 90 % emisija stakleničkih plinova u uzgoju ribe (FAO, 2022.). Uzgoj hrane za životinje, uključujući riblje brašno i biljne sastojke, zahtijeva puno zemlje, vode i energije, što dodatno pogoršava ekološke probleme. Osim toga, akvakultura stvara znatan otpad, uključujući nepojedenu hranu, izmet, nusproizvode metabolizma i kemijske ostatke, a sve to može utjecati na kvalitetu vode i poremetiti vodene ekosustave (Wu, 1995; Dalsgaard i Krause-Jensen, 2006.; Holmer i sur., 2008.).

Opseg tih utjecaja varira ovisno o lokaciji farme, uzgojenim vrstama, gustoći populacije i učinkovitosti hrane. Budući da globalna potražnja za morskim plodovima i dalje raste, hitan je izazov uskladiti rast akvakulture s ekološkom održivošću. Održive prakse u korištenju energije, upravljanju zemljištem, proizvodnji hrane za životinje i obradi otpada ključne su za smanjenje ugljičnog otiska industrije i osiguravanje dugoročne održivosti okoliša.

## 1. Emisije stakleničkih plinova

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

### 1.1. Izvori emisija stakleničkih plinova u akvakulturi

Akvakultura je posljednjih desetljeća doživjela brzi rast i postala je važan dio globalne proizvodnje hrane. Kako se potražnja za morskim proizvodima povećava, akvakultura je postala održivija alternativa tradicionalnom stočarstvu. Međutim, širenje akvakulture sa sobom donosi i ekološke izazove, uključujući emisiju stakleničkih plinova (GHG), uglavnom dušikovog oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ) i ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), iz hrane za životinje, poljoprivredne potrošnje energije, gnojiva i metabolizma životinja (MacLeod i sur., 2019.).

Anaerobni uvjeti u ribnjacima akvakulture potiču proizvodnju  $\text{CH}_4$  zbog razgradnje organske tvari u okolišima bez kisika (Pu i sur., 2022.). Štoviše, emisije  $\text{N}_2\text{O}$  povezane su s mikrobnom aktivnošću u okolišima bogatim dušikom, kao što su one koje nastaju prekomjernom primjenom gnojiva ili hrane za životinje (Bano i sur., 2024.).

## 1.2. Emisije dušikovog oksida i njihovi učinci

$\text{N}_2\text{O}$  se uglavnom proizvodi mikrobnom pretvorbom dušika u tlu tijekom uzgoja usjeva, ali i mikrobnom pretvorbom dušičnih spojeva iz hrane za životinje i gnojiva u ribnjacima akvakulture (MacLeod i sur., 2019.). IPCC (2007.) izvijestio je o povećanim koncentracijama  $\text{N}_2\text{O}$  i  $\text{CH}_4$  od industrijskih vremena, što je zabrinjavajuće jer oba plina, iako prisutna u nižim koncentracijama od ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), imaju 298 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) i 25 ( $\text{CH}_4$ ) puta veći potencijal globalnog zagrijavanja  $\text{CO}_2$  tijekom 100-godišnjeg razdoblja. Brzina stvaranja  $\text{N}_2\text{O}$  određena je nizom fizikalno-kemijskih čimbenika kao što su temperatura, salinitet i pH, koji se mogu mijenjati sezonski. Povećane emisije  $\text{N}_2\text{O}$  iz akvakulture zabilježene su u sustavima uzgoja ribe visoke gustoće, posebno u Aziji, gdje je širenje akvakulture najznačajnije (FAO, 2020.). Studije pokazuju da čak i mala akvakultura može doprinijeti emisijama  $\text{N}_2\text{O}$  usporedivim s onima iz poljoprivrednih djelatnosti (Rahman i sur., 2022.).

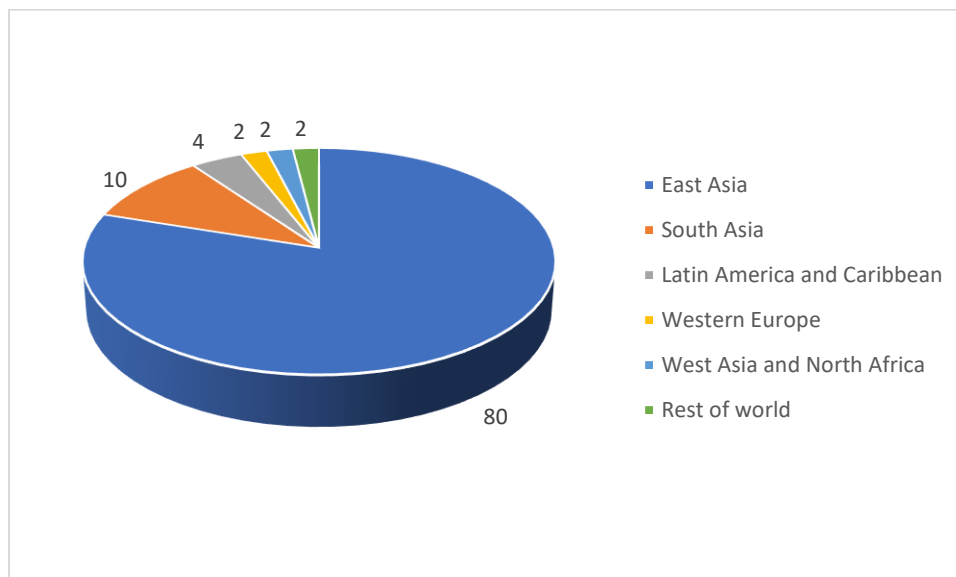
## 1.3. Emisije ugljikova dioksida i metana u akvakulturi

$\text{CO}_2$  se emitira potrošnjom energije prije rada (uglavnom povezanom s proizvodnjom hrane za životinje i gnojiva), potrošnjom energije tijekom rada (npr. crpljenje vode, potrošnja električne energije, upotreba drugih goriva) te distribucijom i preradom nakon rada. Emisije  $\text{CO}_2$  također su posljedica promjena u nadzemnim i podzemnim zalihama ugljika uzrokovanih korištenjem zemljišta i prenamjenom zemljišta (prenamjena travnjaka u poljoprivredno zemljište).  $\text{CH}_4$ , koji se uglavnom stvara anaerobnom razgradnjom organske tvari u uzgoju poplavljenе riže, također se može nastati gospodarenjem otpadom iz ribogojilišta. (MacLeod, 2019). Ribogojilišta stvaraju organski otpad, uključujući nepojedenu hranu, riblji izmet i druge nusproizvode. Kada se ti materijali razgrađuju u anaerobnom okruženju, kao što su sedimenti ili lagune otpada kojima se loše gospodari, oslobađa se metan ( $\text{CH}_4$ ) (Pu i sur., 2022.).

## 1.4. Emisije stakleničkih plinova u globalnoj akvakulturi

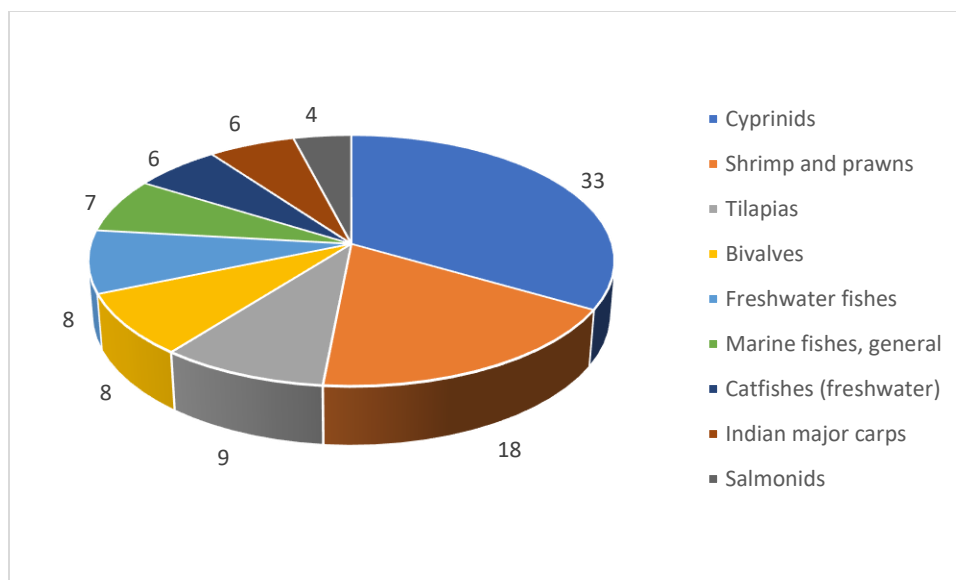
MacLeod i sur. (2019) su ispitali emisije stakleničkih plinova globalne akvakulture, složenog sektora koji se sastoji od mnogo različitih vrsta koje se uzgajaju u različitim sustavima i okruženjima. Analiza se usredotočuje na glavne skupine kultiviranih vodenih vrsta, isključujući morske biljke. Kina je najveći svjetski proizvođač i potrošač vodenih proizvoda, a njezin sektor akvakulture ima ključnu ulogu u osiguravanju globalne sigurnosti opskrbe hranom (FAO, 2020.). Sektor ribarstva u Indoneziji bilježi značajan rast u 2023., pridonoseći oko 3,2% bruto domaćem

proizvodu (BDP) zemlje (Sulistijowati i sur., 2023.). Općenito, istočna i južna Azija najveći su svjetski proizvođači stakleničkih plinova i čine 90 % ukupne proizvodnje (slika 1.).



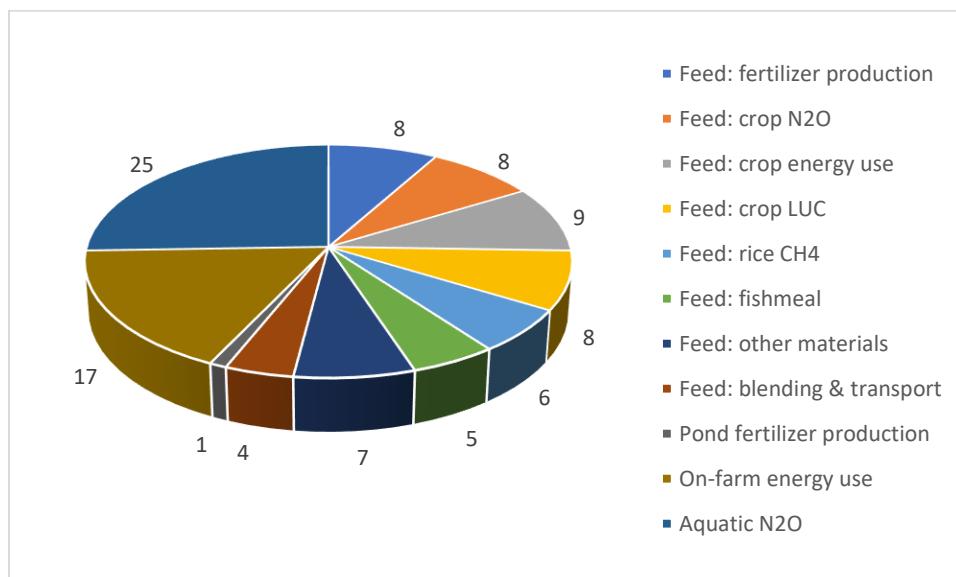
*Slika 1. Postotni udio ukupnih emisija stakleničkih plinova po regijama. Izvor: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626. Rome, FAO.*

Kada se analiziraju podaci za različite vrste, postaje jasno da proizvodnja ciprinida čini najveći udio u emisijama stakleničkih plinova od 33%, a slijedi akvakultura kozica s 18%. Posebno su intenzivni ribnjaci za kozice imali veću produktivnost i uzrokovali su značajne utjecaje na okoliš, posebno u obalnim regijama, jer proizvode velike količine metana zbog anaerobnih uvjeta koji često prevladavaju na muljevitom dnu ribnjaka (slika 2).



Slika 2. Postotni udio u ukupnim emisijama stakleničkih plinova po skupinama vrsta. Izvor: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. *Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626. Rome, FAO.

Nakon različitih plinova i njihovih izvora, najveći utjecaj ima proizvodnja vodene hrane s 55 % svih stakleničkih plinova. Značajan udio imaju i potrošnja energije u poljoprivredi i dušik N<sub>2</sub>O u vodi (slika 3.).



Slika 3.: Postotni udio emisija stakleničkih plinova prema kategoriji izvora Izvor: MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. *Quantifying and mitigating*

## 2. Potrošnja energije

Ugljični otisak operacija akvakulture izravno je povezan s korištenim izvorima energije. U mnogim regijama akvakultura se oslanja na električnu energiju iz fosilnih goriva, koja oslobađa značajne količine CO<sub>2</sub> u atmosferu. Intenzitet ugljika u proizvodnji električne energije varira ovisno o kombinaciji izvora energije određene regije. U područjima u kojima se električna energija pretežno proizvodi iz ugljena, nafte ili prirodnog plina, ugljični otisak operacija akvakulture može biti znatan. Upotreba fosilnih goriva za proizvodnju energije u akvakulturi izravno pridonosi emisijama stakleničkih plinova. Emisije ugljika zbog upotrebe energije u akvakulturi mogu biti znatne, posebno za velike, energetske intenzivne operacije (Li, H. i sur., 2024.).

### 2.1. Energija i održivost u akvakulturi

Unatoč važnosti akvakulture za proizvodnju hrane, izražena je zabrinutost zbog njezina širenja (Naylor i sur., 2000.). Neki od ekoloških problema povezanih s akvakulturom su proizvodnja hrane za životinje i ispuštanje otpadnih voda bogatih hranjivim tvarima u okoliš zbog metabolizma životinja (Thomas i sur., 2021.). Ekološka održivost proizvoda, procesa ili usluga često se procjenjuje pomoću procjene životnog ciklusa (LCA), što je metodologija definirana normama ISO 14040 i 14044 (ISO, 2006a, 2006b) kako bi se kvantificirao potencijalni utjecaj na okoliš na ekosustave, ljudsko zdravlje i prirodne resurse uzrokovan proizvodima i sustavima tijekom cijelog njihova životnog ciklusa (Cucurachi i sur., 2019). Korištenje energije u akvakulturi ključno je za održavanje uvjeta potrebnih za rast uzgajanih vrsta, kao što su cirkulacija vode, prozračivanje, regulacija temperature i hranjenje (tablica 1).

Tablica 1. Potrošnja energije u različitim fazama operacija akvakulture

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

Međutim, ove potrebe za energijom, posebno kada se napajaju fosilnim gorivima, doprinose emisijama ugljika koje pogoršavaju globalno zatopljenje. Kako se industrija nastavlja širiti, razumijevanje i ublažavanje utjecaja akvakulture na okoliš povezanih s energijom ključni su za osiguravanje njezine dugoročne održivosti. Da bi se postigla održivost u akvakulturi, ključno je

uravnotežiti utjecaje na okoliš s potrošnjom energije. Integracijom obnovljivih izvora energije u djelatnosti akvakulture mogu se znatno smanjiti emisije stakleničkih plinova (tablica 2.).

Tablica 2. Primarni izvori energije u akvakulturi

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

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

## 2.2. Energetski intenzivne djelatnosti u akvakulturi

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

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

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

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

### 3. Prenamjena zemljišta i promjena staništa

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

#### 3.1. Uništavanje mangrova i emisije ugljika

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

Uništavanje mangrova za akvakulturu ne samo da im oduzima sposobnost skladištenja ugljika, već i oslobađa pohranjeni ugljik iz tla u atmosferu. Prema Alongiju (2015.), pretvaranje šuma mangrova u uzgajališta kozica dovodi do značajnog povećanja emisije ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>). Budući da su mangrove među ekosustavima s najvećom gustoćom ugljika na planetu i mogu



pohraniti do pet puta više ugljika po hektaru od tropskih šuma, njihov gubitak kritičan je ekološki problem (Barbier i sur., 2011.). Osim gubitka ugljika, degradacija obalnih močvara povećava osjetljivost na eroziju i poplave, slabi otpornost obale i čini lokalne zajednice ranjivijima na utjecaje klimatskih promjena (Barbier i sur., 2011.).

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

Širenje kopnene akvakulture dovelo je i do znatnih promjena u korištenju zemljišta, posebno prenamjenom poljoprivrednog zemljišta i močvarnih područja u akvakulturna. Potaknuta ekonomskim prednostima akvakulture, koja često donosi veće financijske povrate od tradicionalne poljoprivrede, ova pretvorba sa sobom donosi nekoliko ekoloških problema (Ahmed i Thompson, 2019.). Jedan od glavnih problema je uništavanje ekosustava jer se močvare važne za filtriranje vode, kontrolu poplava i biološku raznolikost isušuju kako bi se napravilo mjesta za ribnjake u akvakulturi. To dovodi do gubitka biološke raznolikosti i narušava sposobnost staništa da se nosi s promjenama okoliša.

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

### **3.3. Fragmentacija staništa i gubitak bioraznolikosti**

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

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

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

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

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

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

Kao odgovor na ove izazove, industrija istražuje alternativne sastojke hrane. Biljni proteini poput soje, kukuruza i pšenice neke su od najčešće istraženih opcija. Ti se sastojci smatraju potencijalnim zamjenama za riblje brašno i upotrebljavaju se u hrani za akvakulturu kako bi se smanjila ovisnost o morskim resursima (Duarte i sur., 2020.; O'Flynn i sur., 2021). Osim toga, proteini na bazi kukaca, npr. od vojničkih muha i brašnara, nedavno su se pojavili kao obećavajuća alternativa. Kukci se mogu uzgajati na organskom otpadu i nude potencijalno rješenje za smanjenje potrebe za prenamjenom zemljišta i minimiziranje ekološkog utjecaja (Freda i sur., 2022.).

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

### **4.2. Utjecaj proizvodnje hrane za životinje u akvakulturi na okoliš**

#### **4.2.1. Utjecaj biljne hrane za životinje na okoliš**

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

površine za uzgoj usjeva poput soje i kukuruza, koji su važni za proizvodnju stočne hrane (Fargione i sur., 2023.).

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

Osim prenamjene zemljišta, proizvodnjom biljne hrane povećava se utjecaj na okoliš povećanjem emisija stakleničkih plinova. Prenamjena šuma u poljoprivredno zemljište za proizvodnju stočne hrane znatno doprinosi emisijama ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ). To se događa ne samo izravno gubitkom skladištenja ugljika u šumama, već i energetske intenzivnim procesima koji su uključeni u krčenje i transport (Soussana i sur., 2021.). Osim toga, upotreba sintetičkih gnojiva i pesticida u uzgoju usjeva dovodi do oslobađanja dušikovog oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), snažnog stakleničkog plina koji pogoršava globalno zagrijavanje (Pardoe i sur., 2022.). Te emisije destabiliziraju lokalnu i regionalnu klimu i čine industriju akvakulture ranjivijom na izazove povezane s klimom.

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

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

#### **4.2.4. Ugljični otisak i potrošnja energije**

Osim promjena u korištenju zemljišta, veliki poljoprivredni procesi za proizvodnju hrane za životinje važan su izvor emisija stakleničkih plinova (Soussana i sur., 2021.). Energetski intenzivni procesi povezani s prenamjenom zemljišta, kao i velika potražnja za gnojivima i prijevozom, doprinose značajnom ugljičnom otisku. Osim toga, prerada biljnih materijala u hranu za ribe često uključuje energetske intenzivne procese, što pogoršava utjecaj na okoliš. Ovaj je problem posebno ozbiljan kada su fosilna goriva uključena u proizvodne procese. Kao rezultat toga, ovi ekološki izazovi naglašavaju zabrinutost za dugoročnu održivost biljnih alternativa hrani za životinje suočeni s globalnim klimatskim promjenama.

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

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

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

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

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

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

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

#### **4.3.4. Prelov**

Iskorištavanje divljih resursa i biološke raznolikosti za proizvodnju hrane i opskrbu mladih jedinka i matičnog stoka, može prouzročiti znatnu štetu vodenim ekosustavima (Dev, 1998.; Choo, 2001;

Páez-Osuna, 2001). Ribe iz prirode, niske komercijalne vrijednosti, kao što su japanski incun i lokarda, često se koriste kao hrana za karnivorne ribe ili kao dopunska hrana za vrste kao što su kozice, tilapija i milkfish. Ta praksa stvara dodatni pritisak na već prekomjerno izlovljene stokove divlje ribe. Izlov divlje ulovljene ribe kao što su jegulja, kirnje i tuna dodatno pridonosi iscrpljivanju prirodnih populacija.

Sakupljanje kozica iz prirode i ličinki školjkaša posebno je štetno jer ne samo da prijeti ciljnim vrstama, već ubija i neciljane organizme kao što su druge vrste kozica, makrozooplankton te juvenilne ribe i školjkaši. Ovaj poremećaj hranidbene mreže utječe na širok raspon organizama, uključujući vodene ptice, gmazove i sisavce, što rezultira povećanom smrtnošću i smanjenim uspjehom razmnožavanja (Choo, 2001). Osim toga, uklanjanje divljih vrsta može dovesti do genetske degradacije autohtonih populacija i uništavanja prirodnih staništa, što rezultira daljnjim poremećajem vodenog ekosustava (Dev, 1998). Ovaj je problem posebno važan za gusto izlovljene vrste i one s niskom reproduktivnom sposobnošću. Sve dok je proizvodnja matičnog stoka u zatočeništvu skupa, kupnja divljih jedinki vjerojatno će se nastaviti i uzrokovati daljnju štetu okolišu (Nash, 2005.).

## 5. Otpad

U akvakulturnim pogonima mogu se proizvesti značajne količine otpada/otpadnih voda koje sadrže različite tvari, kao što su čestice (uglavnom iz nepojedene hrane i izmeta), otopljeni metabolički proizvodi (iz izlučivanja škrigama i bubrežima) i različiti oblici kemikalija (npr. terapije, gnojiva, teški metali), s neželjenim posljedicama za okoliš (Wu 1995; Razvoj 1998; Páez-Osuna 2001; Read i Fernandes 2003). Utjecaji na okoliš koji proizlaze iz čestica i otopljenog organskog i anorganskog materijala (tablica 3.) posebno su važni jer ti spojevi izravno ulaze u okoliš i utječu i na vodeni stupac i na sediment (Dalsgaard i Krause-Jensen 2006; Holmer i sur. 2007). Opseg tih utjecaja uglavnom ovisi o lokaciji farme, životinjskoj vrsti, vrsti usjeva, gustoći naseljenosti, probavljivosti hrane za životinje i drugim čimbenicima uzgoja kao što su prehrambene prakse i status bolesti (Wu 1995).

Tablica 3. Pokretači, pritisci, stanja, učinci i odgovori na hipotetski razvoj akvakulture (Serpa i Duarte, 2008.)

Pokretač	Pritisak	Stanje	Utjecaj	Odgovor
Uzgoj riba	Povećani tokovi hranjivih tvari	Povećana hranjiva i organska koncentracije tvari	Povećani fitoplankton biomasa/eutrofikacija	Proizvodnja morskih algi za uklanjanje višak hranjivih tvari
	Povećani tokovi organske tvari	Smanjena razina kisika.	Veća smrtnost od bentosa	Donje prozračivanje

	Smanjena razina kisika i kisik	Nakupljanje organske tvari u sedimentima	organizmi/smanjena bentoska raznovrsnost	
	Povećane sile otpora	Smanjeni protok i Povećano vrijeme boravka	Povećano taloženje sedimenta	Preraspodjela na područja s više intenzivna hidrodinamika
	Oslobađanje ksenobiotika	Biokoncentracija	Povećana smrtnost neciljanih osoba vrsta	Manje intenzivna poljoprivreda do smanjiti širenje bolesti

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

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

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

## 5.1. Onečišćenje hranjivim tvarima

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

Unos anorganskih spojeva (npr. amonijaka, nitrata, nitrita i fosfata) razgradnjom organske tvari, izlučivanjem životinja i gnojibom iz ribnjaka također može imati potencijalno opasne učinke na okoliš (Wu 1995; Razvoj 1998; Tovar et al. 2000; Pérez-Osuna 2001; Pearson i Black, 2001; Read & Fernandes 2003; Biao & Kaijin 2007; Pérez et al. 2008). Većina nepoželjnih ekoloških posljedica povezanih s prekomjernom dostupnošću hranjivih tvari iz ispuštanja iz akvakulture povezana je s eutrofikacijom i uključuju, na primjer, hipernutritifikaciju i iscrpljivanje otopljenog kisika koji uzrokuju pogoršanje kvalitete vode (Tovar i sur., 2000a; Read & Fernandes 2003). Opterećenje hranjivim tvarima također doprinosi bazenu biljnih hranjivih tvari u vodenim

sustavima, potičući rast primarnih proizvođača (Read & Fernandes 2003; Biao & Kaijin 2007), pa čak i promjenu strukture i sastava ovih ključnih zajednica.

Ako se obogaćivanje hranjivim tvarima podudara s određenim fizičkim uvjetima i drugim, slabo shvaćenim čimbenicima, može doći do rasta toksičnih vrsta fitoplanktona, što dovodi do stvaranja štetnog cvjetanja algi, HAB (Biao & Kaijin 2007). Na primjer, izvješća o HAB-u *marine Chattonella*, vjerojatno uzrokovana ispuštanjem otpadnih voda s farmi kozica, dokumentirana su duž obale sjeverno od Žutog mora 1993. i 1995. godine (Biao & Kaijin 2007). Toksično cvjetanje fitoplanktona može proizvesti različite vrste toksina (npr. DSP - trovanje školjkašima u dijareji, PSP - paralitičko trovanje školjkašima i ASD - amnezijska bolest školjkaša), koji često uzrokuju trovanje školjkašima i smrtnost bentoske faune i divlje/uzgojene ribe, čime se ugrožava ekonomska održivost aktivnosti akvakulture (Pearson i Black 2001; Read & Fernandes 2003; Gyllenhamman & Hakanson 2005). Iako se čini da potencijal za eutrofikaciju nije vjerojatan za uzgoj u morskim kavezima zbog učinka razrjeđivanja morske vode (Wu 1995; Pearson i Black 2001), ne može se isključiti mogućnost lokalizirane eutrofikacije u područjima slabog ispiranja (Wu 1995; Pearson i Black 2001). Što se tiče ograničenih područja razmjene, kao što su obalne lagune i estuariji, prekomjerna dostupnost hranjivih tvari može utjecati na produktivnost ekosustava, a u nekim slučajevima i negativno utjecati na samu aktivnost akvakulture (Dev 1998; Pérez-Osuna 2001b).

## 5.2. Kemijska kontaminacija

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

Upotreba antibiotika u akvakulturi ima nekoliko negativnih učinaka na okoliš. Raširena upotreba antibiotika u akvakulturi može dovesti do razvoja bakterija otpornih na antibiotike, koje mogu prenijeti svoje gene otpornosti na druge bakterije, uključujući one koje uzrokuju bolesti kod ljudi i drugih životinja (Okocha i sur., 2018.). Antibiotici mogu imati toksične učinke na zajednice mikroorganizama u vodenom okolišu, uključujući zajednice algi, koje su ključne za zdravlje vodenih ekosustava (Li i sur., 2024.). Osim toga, antibiotici i njihovi nusproizvodi mogu opstati u prirodnom okruženju zbog svoje teške biorazgradnje, nakupljajući se u sedimentima, vodenim



površinama i podzemnim vodama, što dovodi do dugotrajne kontaminacije okoliša. Prisutnost antibiotika u vodenom okolišu može potaknuti ozbiljne promjene u sastavu i strukturi bakterijskih zajednica, utječući na cjelokupno zdravlje i biološku raznolikost vodenih ekosustava (Luthman i sur., 2024.). Nadalje, upotreba antibiotika u akvakulturi može dovesti do prisutnosti zaostalih antibiotika u ribi i drugim proizvodima akvakulture, što predstavlja rizik za zdravlje ljudi koji konzumiraju te proizvode. Neselektivna upotreba antibiotika u akvakulturi također može rezultirati poremećajem normalne crijevne flore kod vodenih životinja, što dovodi do negativnih utjecaja na njihovo zdravlje i rast. Štoviše, nakupljanje antibiotika u okolišu može dovesti do razvoja patogena otpornih na antibiotike, koji se mogu proširiti na druge ekosustave i predstavljati prijetnju vodenom i kopnenom životu (Farias i sur., 2024.).

Koriste se i drugi biološki proizvodi, kao što su razlagači organske tvari (npr. bakterije i enzimski pripravci) (Gräslund i Bengtsson 2001). Primjena ovih kemikalija uglavnom ovisi o sustavu kulture. Na primjer, dok poluintenzivne farme kozica zahtijevaju minimalnu upotrebu kemikalija, uglavnom gnojiva i materijala za vapnenje (Boyd i Massaut 1999; Choo 2001; Gräslund & Bengtsson 2001), kako se proizvodnja kozica intenzivira, upravljanje postaje problematičnije, a broj i raznolikost kemijskih spojeva uvelike se povećava (Gräslund & Bengtsson 2001).

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

## Sažetak

Akvakultura igra ključnu ulogu u globalnoj sigurnosti hrane, ali njezino brzo širenje izazvalo je značajnu zabrinutost za okoliš, posebno u doba klimatskih promjena. Industrija je glavni izvor emisija stakleničkih plinova, uništavanja staništa i iscrpljivanja resursa. Ugljični dioksid, metan i dušikov oksid oslobađaju se energetske intenzivnim operacijama, proizvodnjom hrane za životinje i gospodarenjem otpadom. Mnogi objekti akvakulture oslanjaju se na fosilna goriva za električnu energiju, povećavajući emisiju ugljika, dok anaerobni uvjeti u ribnjacima doprinose ispuštanju metana. Osim toga, emisije dušikovog oksida proizlaze iz okruženja bogatog dušikom stvorenog viškom hrane i gnojiva. Brzo širenje akvakulture dovelo je i do raširenih promjena u korištenju zemljišta, posebno u obalnim i močvarnim ekosustavima. Mangrove i druga vitalna staništa



očišćena su kako bi se napravio prostor za farme kozica i ribnjake, što je dovelo do gubitka bioraznolikosti, obalne erozije i smanjene sekvencije ugljika. Proizvodnja hrane za životinje jedan je od najvećih čimbenika koji doprinosi ekološkom otisku akvakulture i čini većinu emisija. Tradicionalna hrana na bazi ribljeg brašna vrši pritisak na morske resurse, dok biljne alternative, poput soje, doprinose krčenju šuma, degradaciji zemljišta i prekomjernoj upotrebi vode. Proteini na bazi insekata i drugi novi izvori hrane nude potencijalna rješenja, ali usvajanje velikih razmjera i dalje je ograničeno zbog ekonomskih i logističkih izazova. Drugi veliki problem je stvaranje otpada, jer nepojedena hrana, riblje izlučevine i kemijski ostaci doprinose onečišćenju vode, eutrofikaciji i štetnom cvjetanju algi, što dovodi do iscrpljivanja kisika i neravnoteže ekosustava. Upotreba antibiotika u akvakulturi izaziva zabrinutost zbog otpornosti na antibiotike, koja može utjecati i na vodeni okoliš i na ljudsko zdravlje. Rješavanje ovih izazova zahtijeva pomak prema održivim praksama, uključujući integraciju obnovljive energije, optimizaciju učinkovitosti hrane, usvajanje odgovornih strategija korištenja zemljišta i provedbu učinkovitih rješenja za gospodarenje otpadom. Kako globalna potražnja za morskim plodovima nastavlja rasti, balansiranje rasta akvakulture s odgovornošću za okoliš ključno je za osiguravanje dugoročne održivosti industrije i minimiziranje njezina ekološkog utjecaja.

## Literatura

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

Alongi, D.M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, vol. 29, no. 3, pp. 331–349.

Alongi, D. M. (2015). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 56, 1-10.

Bano, S., Wu, Q., Yu, S., Wang, X., & Zhang, X. (2024). Soil properties drive nitrous oxide accumulation patterns by shaping denitrifying bacteriomes. *Environmental Microbiome*, 19, 94.

Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, Vol. 81, No. 2, pp. 169-193.

Biao, X., & Kaijin, Y. (2007). Shrimp farming in China: Environmental impact and sustainability. *Aquaculture International*, 15(5), 21-39

Boyd, C. E., et al. (2020). Environmental assessment and management in aquaculture. *Aquaculture International*, 28(2), 697-716.

- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113-132.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of energy consumption by the fish farming and processing industry in Croatia and the potential for zero-emissions aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bureau, D. P., & Cho, C. Y. (2006). Feeding strategies and diet formulation to reduce waste outputs in aquaculture. *Aquaculture Research*, 37(3), 123–135.
- Chavez, J., et al. (2020). Effects of aquaculture on habitat fragmentation and ecosystem dynamics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 452-465.
- Choo, P. S. (2001). Mangroves, shrimps and aquaculture in Malaysia. *Aquaculture Asia Magazine*, 6(2), 5-7.
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Diet formulation and feeding systems to reduce environmental impact in aquaculture. *Aquaculture Research*, 29(3), 123–135.
- Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., & Tukker, A. (2019). Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth*, 1(3), 292–297.
- Dalsgaard T, Krause-Jensen D (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture* 256:302–310.
- Dev, A.K. (1998) Fake Blue Revolution: Environmental and Socio-Economic Impacts of Shrimp Culture in the Coastal Areas of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 41, 63-88.
- Duarte, T. A., Correia, D. M., & Silva, J. L. (2020). The role of alternative protein sources in sustainable aquaculture: Plant-based proteins. *Aquaculture Research*, 51(4), 1234-1247.
- FAO (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. FAO.
- Fargione, J., Tilman, D., & Clark, M. (2023). Agricultural expansion and its impact on biodiversity: A global perspective. *Nature Sustainability*, 6(3), 182-190.
- Farias, D. R., Ibarra, R., Estévez, R. A., Tlustý, M. F., Nyberg, O., Troell, M., Avendaño-Herrera, R. & Norden, W. (2024). Towards Sustainable Antibiotic Use in Aquaculture and Antimicrobial Resistance: Participatory Experts' Overview and Recommendations. *Antibiotics*, 13(9), 887;

- Freda, C. G., Smith, M., & Gupta, M. (2022). Insect protein as a sustainable alternative for aquaculture: An environmental review. *Journal of Insect Science*, 22(1), 10-20.
- Gräslund, S., & Bengtsson, B. E. (2001). Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment—A review. *The Science of the Total Environment*, 280(1-3), 93-131.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Diez, J. M., Damschen, E. I., & Holt, R. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on biodiversity. *Nature Communications*, 6, 7926.
- Harper, G.J., Steininger, M.K., Tucker, C.J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007). Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, vol. 34, no. 4, pp. 325–333.
- Holmer, M., Hansen, P.K., Karakassis, I., Borg, J.A., Schembri, P.J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In: Holmer, M., Black, K., Duarte, C.M., Marbà, N., Karakassis, I. (eds) *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.
- Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007): Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007). Sediment biogeochemical changes associated with fish farms in coastal Mediterranean regions. *Environmental Pollution*, 118(2), 313-319.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Islam, M. S., Kabir, M. S., Khan, S. I., Ekramullah, M., Nair, G. B., Sack, R. B., & Sack, D. A. (2004). Wastewater-grown duckweed may be safely used as fish feed. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(1), 51-56.
- Kalantzi and Karakassis, 2006: Kalantzi, I., & Karakassis, I. (2006). Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52(5), 484-493.
- Kautsky et al., 2000: Kautsky, N., Berg, H., Folke, C., Larsson, J., & Troell, M. (2000). Ecological footprint and trophic level impact of aquaculture: Implications for sustainability. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1-12
- Kelly, L. A., & Elberizon, I. R. (2001). Freshwater finfish cage culture. In K. D. Black (Ed.), *Environmental Impacts of Aquaculture* (pp. 1-32). Sheffield Academic Press.
- Li, Z., He, H., Ding, J., Zhang, Z., Leng, Y., Liao, M. & Xiong, W. (2024). Effects of Three Antibiotics on Nitrogen-Cycling Bacteria in Sediment of Aquaculture Water. *Water*, 16(9), 1256.

- Li, H., Liu, H., Zhou, X., Gao, L., Liang, J., Chen, L., Guo, Y., & Liang, S. (2024). Carbon footprint assessment and reduction strategies for aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), n/a.
- Luthman, O., Robb, D. H., F., Jørgensen, P. S. & Troell, M. (2024). Global overview of national regulations for antibiotic use in aquaculture production. *Aquaculture International*, 32:9253–9270.
- MacLeod, M., Hasan, M.R., Robb, D.H.F. & Mamun-Ur-Rashid, M. 2019. Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626. Rome, FAO.
- Magrin, G. O., Rojas, S. M., & Tschakert, P. (2020). Soybean monocultures and their environmental impact: A case study of the expansion in South America. *Environmental Research Letters*, 15 (7), 074010.
- Matulić, D., Tomljanović, T., & Piria, M. (2020). Feeding systems in aquaculture: Efficiency and environmental impact. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 11(3), 123–135.
- Marrone, A., Mangano, M. C., Deidun, A., Berlino, M., & Sarà, G. (2023). Effects of habitat fragmentation of a Mediterranean marine reef on the associated fish community: Insights from biological traits analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1957.
- Naylor, R.L., Goldburg, R.J., J. H. Primavera, J.H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, vol. 405, no. 6790, pp. 1017–1024.
- Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.
- Nordvarg and Håkanson, 2002: Nordvarg, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359-379.
- O’Flynn et al., 2021: O’Flynn, N., FitzGerald, R. J., & Hayes, M. (2021). Plant-based proteins as alternatives to fishmeal in aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 27(3), 123–135.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O. & Adedeji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public Health Rev* 39, 21.
- Páez-Osuna, F. (2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environmental Management*, 28(1), 131-140.
- Paez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaronicultura en ´ la zona costera, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 1, 21-31.

- Pardoe, J. R., Leach, D. H., & Minchinton, T. E. (2022). Environmental challenges of plant-based feed ingredients in aquaculture: Implications for water and nutrient management. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111-121.
- Parker et al. (2018): Parker, R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.
- Pearson, T. H., & Black, K. D. (2001). *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press.
- Pérez, M., Romero, J., & Duarte, C. M. (2008). *Nutrient dynamics in seagrass ecosystems*. Springer.
- Pu, Y., Zhang, Mi., Jia, L., Zhang, Z., Xiao, W., Liu, Shoudong., Zhao, J., Xie, Y & Lee, X. (2022). Methane emission of lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 330, 107883.
- Rahman, M., et al. (2022). Land use transformation and environmental consequences of aquaculture expansion in Sundarbans. *Environmental Sustainability*, 25(1), 87-104.
- Read, P., & Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, 226(1-4), 139-163.
- Ruiz, J. M., Pérez, M., & Romero, J. (2001). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: Seagrass decline after organic loading cessation. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), 38-41.
- Serpa, D., Duarte, P. (2008). Impacts of Aquaculture and Mitigation Measures. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, vol 2, Special Issue 1, 1-20
- Soussana, J. F., Lemaire, G., & Van de Kuilen, S. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture: Global impact of feed production. *Agricultural Systems*, 181, 102808.
- Sulistijowati, R., Yuliati, L., Komariyah, S. & Musaiyaroh, A., (2023). Analysis of Trade, Investment, and Global Value Chain on the Gross Domestic Product of Fisheries Sector in Indonesia. *International Journal of professional business review*, vol 8, no 6.
- Sun, Z., Wang, L., Tian, H., Jiang, H., Mou, X. & Sun, W. (2013). Fluxes of nitrous oxide and methane in different coastal Suaeda salsa marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*. Vol 90, 856-865.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2009). "Aquaculture feed and the environment: A global perspective." *Aquaculture*, 292(1-2), 1-13.

Talbot, C., Corneillie, S., & Korsøen, O. (1999). Optimal feeding strategies for cage farming of salmonids. *Aquaculture International*, 7(2), 123–135.

Tidwell, J.H. & Allan, G.L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. Ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries, EMBO Reports, vol. 2, no. 11, pp. 958–963.

Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767–784.

Thorpe, J. E., & Cho, C. Y. (1995). Nutritional requirements and feeding strategies for salmonids. *Aquaculture Nutrition*, 1(1), 77–87.

Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M. P., & Garcia-Vargas, M. (2000). Environmental impacts of intensive aquaculture: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7-12), 550-563.

United Nations Environment Programme. (2022). How do greenhouse gases actually warm the planet? <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-do-greenhouse-gases-actually-warm-planet>

Walters, B.B., Ronnback, P., J. Kovacs, J.M., Bradley B., Crona, B., Hussain, S.A., Badola, R., Primavera, J.H., Barbier, E & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, vol. 89, no. 2, pp. 220–236.

White, P. 2013. Environmental consequences of poor feed quality and feed management. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. *On-farm feeding and feed management in aquaculture*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583. Rome, FAO. pp. 553–564.

Wróbel, J., Gałczyńska, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., & Formicki, K. (2023). The challenges of aquaculture in protecting the aquatic ecosystems in the context of climate changes. *Journal of Water and Land Development*, 57, 231–241.

Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.

## Rječnik

**Anaerobni uvjeti:** Okruženja u kojima ima malo ili nimalo kisika, poput dna ribnjaka ili močvara. U takvim uvjetima organski materijal se različito razgrađuje, često oslobađajući plinove poput metana.

**Bioraznolikost:** Odnosi se na raznolikost života na nekom području, uključujući biljke, životinje i mikroorganizme. Bioraznolikost je ključna za zdrave ekosustave jer svaka vrsta ima ulogu u održavanju ravnoteže.

**Ugljični otisak:** Ukupna količina stakleničkih plinova (poput ugljičnog dioksida i metana) proizvedenih ljudskim aktivnostima, kao što su vožnja, proizvodnja hrane ili operativna industrija, koji doprinose klimatskim promjenama.

**Eutrofikacija:** Proces u kojem vodena tijela, poput jezera ili rijeka, primaju previše hranjivih tvari (poput dušika i fosfora). To uzrokuje prekomjerni rast algi, koje mogu blokirati sunčevu svjetlost i smanjiti kisik, šteteći vodenom životu.

**Omjer konverzije hrane (FCR):** Mjera učinkovitosti životinje u pretvaranju mase hrane u tjelesnu masu, koja se koristi kao pokazatelj u akvakulturi.

**Staklenički plinovi (GHG):** Plinovi poput ugljičnog dioksida, metana i dušikovog oksida, koji zadržavaju toplinu u atmosferi i doprinose globalnom zatopljenju.