



Funded by
the European Union



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

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

prof. dr. sc. Ergün Demir

doc. dr. sc. Muhittin Zengin

Sveučilište Balıkesir

Uvod

Akvakultura je jedan od najbrže rastućih poljoprivrednih sektora na svijetu i sve je važnija za proizvodnju održive i zdrave hrane s relativno malim utjecajem na klimu. Predviđa se da će uzgoj ribe porasti za 32% do 2030. (FAO, 2020.). Tržišne sile slažu se da je poticanje rasta europske akvakulture jedini održiv način da se zadovolji potražnja za povećanjem zaliha ribe. Međutim, teško je ispuniti održivu proizvodnju koja će doprinijeti zdravoj prehrani, ispuniti ciljeve održivog razvoja i težiti nultoj stopi emisija (Messeder, 2021.). Procjenjuje se da će se pod klimatskim promjenama doći do smanjenja dostupnosti hranjivih tvari (Cheung i sur., 2023.). Nestašica visokokvalitetne hrane za životinje i sastojaka hrane za životinje te sigurnost i kvaliteta vodenih proizvoda predstavljaju probleme za održivi razvoj ovog sektora (Ma i Hu., 2023.).

Uzgoj ribe stvara 250 milijuna tona ekvivalenta CO₂ godišnje na globalnoj razini (MacLeod i sur., 2020.). Uzgoj lososa stvara 10 milijuna tona ekvivalenta CO₂ godišnje. Hrana za životinje čini u prosjeku 75% emisija stakleničkih plinova (GHG) lososa proizvedenog u Norveškoj (Ziv-Douki, 2020.). U usporedbi sa stočarskom proizvodnjom, posebno govedinom, proizvodnja morske hrane ima niže emisije ugljika.

Promjene temperature uzrokuju slab rast i opstanak hladnovodnih vrsta, pogoršanje kvalitete vode, oslabljen imunološki sustav hladnovodnih vrsta, oslabljen kapacitet pohrane ugljika u oceanima i povećanu virulenciju patogena u toplijoj vodi. Budući da hrana za životinje znatno doprinosi ugljičnom otisku akvakulture, trebalo bi ciljati na velika smanjenja emisija u proizvodnji hrane za životinje (Zhang i sur., 2024.).

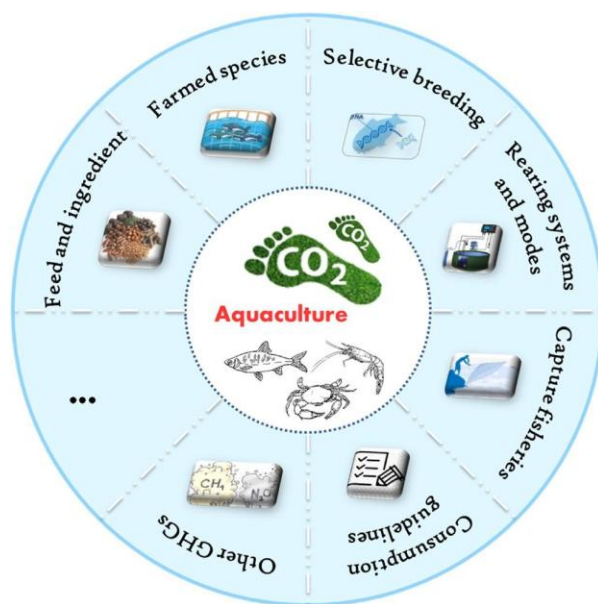


Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247



Slika 1. Interventni sektori za smanjenje emisija ugljika u akvakulturi (prilagođeno iz Zhang et al., 2024.).

1. Prehrambene potrebe i promjene metabolizma

1.1. Utjecaj temperature na metabolizam

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

1.2. Učinkovitost hrane, probavljivost hranjivih tvari i vrijeme prolaska kroz crijevo hrane za životinje

Promjene u brzini metabolizma izazvane temperaturom utječu ne samo na energiju prehrane, već i na omjer učinkovitosti hrane (FER, dobitak/hrana) ili omjer konverzije hrane (FCR, hrana/dobitak). Razlika u temperaturi vode od nekoliko stupnjeva može proizvesti velike razlike u konverziji hrane kod nekih vrsta (Siikavuopio i sur., 2012). Promjene FCR-a uzrokovane



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

promjenama temperature vode također mogu uzrokovati promjene u probavljivosti određenih kategorija hranjivih tvari kao što su masne kiseline u salmonida (Huguet i sur., 2015.). S druge strane, može se reći da je utjecaj temperature vode na probavljivost hranjivih tvari kod vodenih životinja općenito minimalan. S tim u svezi, studije provedene na lososu pokazale su da probavljivost proteina i lipida može pokazati male promjene s temperaturom (Amin i sur. 2014). Neke studije pokazuju da na *"vrijeme prolaska hrane kroz crijevo"* može utjecati toplija voda, ovisno o vrsti. Studije naglašavaju da će visoke temperature vode imati minimalan učinak na hranjive tvari ili probavljivost energije vodenih životinja dok se ne prekorači optimalni raspon (Reid i sur., 2019.).

1.3. Unos hrane i brzina metabolizma

Globalno zatopljenje i posljedične klimatske promjene dovode do zagrijavanja i zakiseljavanja vodnih tijela, promjena oborina i obrasca vjetera, a time utječu na vodene struje, turbulencije i zamućenost. Te promjene uzrokuju promjene u prehrani i endokrinom sustavu kod vodenih životinja (Nadermann i sur., 2019.). Klimatske promjene i promjene u vodenom okolišu uzrokovane ispuštanjem ugljičnog dioksida (CO₂) i metana u atmosferu također mogu utjecati na fiziologiju i ponašanje riba, kao i na hranjenje i endokrinu kontrolu hranjenja (Ahmed i sur., 2019.; Volkoff, 2019).

Ribe, kao ektotermna stvorenja, vrlo su osjetljive na promjene temperature vode. Povećanje temperature vode povećava potrošnju kisika i brzinu metabolizma i, posljedično, energetske potrebe (Sandblom i sur., 2014.). Iako se ove promjene razlikuju ovisno o vrsti, unos hrane povećava se s umjerenim porastom temperature kod riba (Sharma i sur., 2017.). Studije pokazuju da povećanje CO₂ i nizak pH vode smanjuju unos hrane u ribe i narušavaju njihovu sposobnost percepcije kemijskih signala i hrane narušavajući njihov njuh (Porteus i sur., 2018). Budući da ribe zahtijevaju povećane pokrete mišića kako bi održale ravnotežu u turbulentnim vodama, ribe također povećavaju svoju energiju, a uvjeti slabe vidljivosti također negativno utječu na hranjenje riba.

1.4. Utjecaj klimatskih promjena na mikrofloru ili mikrobiotu riba

Morfologija probavnog sustava riba ima izravan utjecaj na probavni kapacitet i imunološki status riba, ali su također osjetljive na toplinski stres, što utječe na njihovo zdravlje (Geda i sur., 2012). Poznato je da toplinski stres može imati negativne učinke na resice i područje apsorpcije u probavnom sustavu različitih životinjskih vrsta poput svinja i pilića. Međutim, učinci toplinskog stresa na morfologiju ribljih crijeva nisu u potpunosti shvaćeni. Crijevna mikrobiota općenito stupa u interakciju s crijevima domaćina na složen način i sudjeluje u gotovo svim fiziološkim



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

procesima, uključujući metabolizam i imunitet (Gardiner i sur., 2020; Yadav i Jha, 2019) i osjetljiva je na temperaturne promjene. Pokazalo se da povišena temperatura vode uzrokuje smanjenje korisnih bakterija mliječne kiseline i povećanje potencijalno opasnog *Vibrio* spp. u atlantskom lososu (*Salmo salar*) (Amin i sur., 2016). Međutim, čini se da su učinci toplinskog stresa na crijevnu mikrobiotu specifični za vrstu.

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

2. Održivi sastojci hrane za životinje u akvakulturi

Akvakultura bi mogla proizvoditi životinjske bjelančevine s nižim emisijama stakleničkih plinova od uzgoja životinja na kopnu (Hilborn i sur., 2018.). Stoga je akvakultura klimatski prihvatljiviji sektor proizvodnje proteina od ostalih vrsta (NOAA Fisheries, 2022.). Hrana za akvakulturu koristi više od 70% svjetskog ribljeg brašna i ribljeg ulja (FMFO). Globalno, od otprilike 30 milijuna tona male ribe ulovljene u oceanu svake godine, otprilike 17 milijuna tona koristi se u hrani za akvakulturu (Cottrell i sur., 2020.). Stoga upotreba alternativnih izvora bjelančevina za hranu za akvakulturu može smanjiti utjecaj akvakulture na okoliš, potencijalno proizvodeći isplativiju hranu za životinje i razvijajući konkurentan sektor. Alternativni izvori proteina kao što je brašno od kukaca nisu novi, ali nedavna ulaganja u ovaj sektor približavaju ga spremnosti za tržište. Dobar primjer za to su nove inicijative pokrenute kako bi se uzgajivačima lososa pomoglo da smanje svoj ekološki otisak za 30% do 2030. godine. Druge izvore hrane za životinje, posebno morske alge, trebalo bi dalje razvijati. Istraživanje industrijske biotehnoške hrane za životinje još je jedno područje u nastajanju. Ekstruzija povećava probavljivost i apsorpciju hranjivih tvari u hrani za životinje (Zhang i sur., 2024).

2.1. Alternativna hrana/izvori bjelančevina



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

Više od 90 % stakleničkih plinova u akvakulturi nastaje hranom za ribe koja se koristi. Pristup kružnog gospodarstva može se koristiti u proizvodnji hrane za životinje u ribogojilištima koja koriste nove biomaterijale za postizanje ciljeva u pogledu klimatskih promjena (Tait, 2021.). Danas otprilike 70% ukupne globalne proizvodnje akvakulture po težini ovisi o opskrbi vanjskim ulaznim sirovinama za životinje. Ova je situacija jedan od najvećih izazova za buduću održivost akvakulture, što zahtijeva razvoj alternativnih sastojaka hrane (Reid i sur., 2019.).

Ograničen i smanjen globalni ribolov uzrokuje smanjenje globalne proizvodnje ribljeg brašna (oko 5 milijuna tona godišnje) i ribljeg ulja (približno 1 milijun tona godišnje). Budući da se 60-80% ovog ribljeg brašna i otprilike 70-80% ribljeg ulja koristi u akvakulturi (FAO, 2022). S obzirom na sve veću potražnju za FMFO-ima koja proizlazi iz stalno rastuće industrije akvakulture, imperativ je pronaći prikladne zamjene za FMFO za održivu akvakulturu.

2.1.1. Riblje brašno i riblje ulje kao glavni sastojci hrane za akvakulturu

Akvakultura je u osnovi proizvodna linija koja koristi "hranjene" vrste kao što su kozice, brancin i losos te "nehranjene" vrste kao što su srebrni šaran, morske alge, kamenice. Tradicionalno, hranjena akvakultura oslanjala se na hranu koja sadrži visoke razine FMFO (Froehlich i sur., 2018). Međutim, upotreba FMFO-a smatra se vodećim neodrživim čimbenikom u akvakulturi jer povećava pritisak na riblje stokove i narušava ravnotežu vodenih prehrambenih mreža (Hua i sur., 2019.). Ovisnost o hrani za životinje koja se temelji na ribi za akvakulturu predstavlja prijetnju morskoj biološkoj raznolikosti i sigurnosti opskrbe hranom. Kao što je poznato, klimatske promjene i El Niño negativno utječu na mnoge prirodne izvore vodene hrane, posebno fitoplankton. Iz tih razloga, količina FMFO koja se koristi u vodenoj hrani smanjuje se tijekom godina. Drugi problem uzrokovan ribljim brašnom je povećano nakupljanje teških metala, kemikalija i mikroplastike u morskim ribama (Hanachi i sur., 2019.).

2.1.2. Hrana za životinje/ulja biljnog podrijetla i ekološki izazovi



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

2.1.3. Nusproizvodi kao hrana za akvakulturu

Nusproizvodi prerade ribe

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

Najvažnija metoda zbrinjavanja ovih nusproizvoda je njihova upotreba u formulacijama hrane za stoku i vrstama u akvakulturi. Prema Uredbi EU-a 1069/2009, riba i nusproizvodi akvakulture dio su nusproizvoda kategorije 3, koji se smiju uključiti u prehranu životinja kako bi odgovorno doprinijeli okolišu i javnom zdravlju (Gasco i sur., 2020.). Odbačeni nusproizvodi ribarstva mogu se upotrebljavati u proizvodnji FMFO-a (Li i sur., 2019.). *Enzimska hidroliza* ribarskog otpada još je jedna tehnika za preradu otpada u hidrolizate ribljih bjelančevina (Gasco i sur., 2020.).

U studiji (Warwas, 2023.) u hrani za kalifornijsku pastrvu korištena su tri različita nusproizvoda prerade ribe bez odvajanja frakcija masti i proteina, a rezultati su pokazali da o uvjetima skladištenja i preradi ovisi mogu li se nusproizvodi koristiti kao izravni sastojci. Uključivanje 50% svježih dodataka inćuna u hranu povećalo je rast i unos hrane te dobro zdravlje crijeva. Međutim, postoje i nedostaci korištenja ovih nusproizvoda kao što su vrijednosti proteina i esencijalnih



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

aminokiselina, higijenski problemi, rok trajanja proizvoda i zabrana koju nameće EU [Uredba (EZ) br. 1069/2009, kojom se sprječava hranjenje nusproizvoda istim vrstama u akvakulturi (Gasco i sur., 2020.).

Otpad od hrane

Rasipanje hrane može se koristiti i kao izvor bjelančevina u proizvodnji hrane za akvakulturu (Shahin i sur., 2023.). Otpad od hrane uključuje sirove i kuhane prehrambene materijale te reciklirane ostatke hrane. Poznato je da se godišnje proizvede oko 1,5 milijardi tona ostataka ljudske hrane, što odgovara približno 1/3 ukupne godišnje proizvodnje ljudske hrane. Iako nisu prikladni za sve vrste akvakulture, ovaj otpad od hrane može se koristiti za neke svejede vrste kao što je tilapija (Nasser i sur., 2018.) i druge vrste niske trofičke razine, kao što su amur i cipal (Mo i sur., 2014.). Međutim, kao dio načela "predostrožnosti" koje se primjenjuje u politici sigurnosti hrane EU-a, upotreba otpada od hrane za ribe ili rastuće kukce nije dopuštena (Fowles i Nansen, 2020.).

2.1.4. Jednostanični organizmi / proteini (SCO/SCP)

Mikroorganizmi kao što su *mikroalge*, *morske alge (makroalge)*, *kvasci*, *gljive*, *bakterije* i druge alternativne komponente predstavljaju značajan potencijal u hrani za akvakulturu zbog izvora proteina/aminokiselina, lipida ili omega-3 masnih kiselina. Uz sve veću upotrebu ovih mikroorganizama u akvakulturi, zajedno s tehnološkim inovacijama, bit će moguće smanjiti i ekološki otisak hrane za akvakulturu (Sarker, 2023.). Te se pojednostavnjene mogućnosti financiranja mogu smatrati održivim izvorom hrane za životinje jer brzo rastu, troše vrlo malo slatke vode i za reprodukciju im nije potrebno poljoprivredno zemljište (Albrektsen i sur., 2022.).

Miroalge (fitoplankton)

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

Bjelančevine i ulje mikroalgi također mogu zamijeniti FMFO u hrani za akvakulturu. Sadržaj sirovih bjelančevina u mikroalgama je na razinama od 50 do 70% (Nagappan i sur., 2021; Ma i Hu, 2023). Budući da mikroalge mogu sintetizirati sve aminokiseline de novo, njihovi aminokiselinski profili bili su dobro uravnoteženi za hranu za vodene životinje (Becker i sur.,



Funded by
the European Union

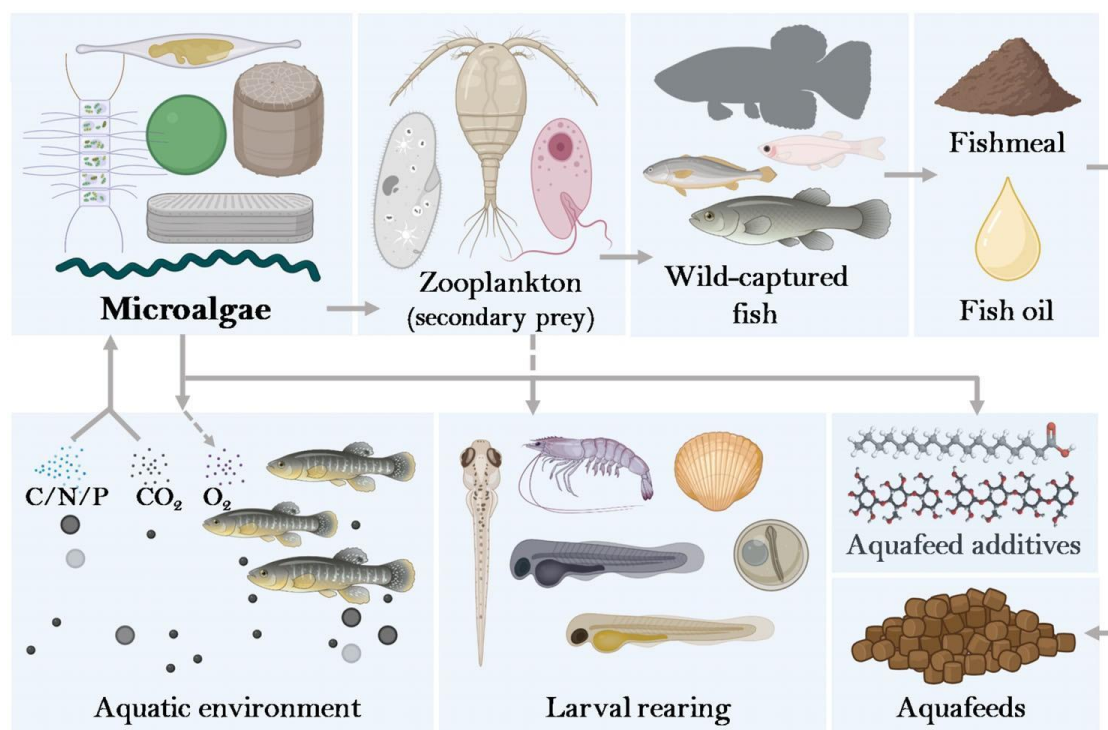


The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future - Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

2013). Ukupni sadržaj lipida u mikroalgama može doseći i do 45 do 60% mase suhih stanica (Ahmad i sur., 2022.). Budući da mikroalge imaju sposobnost sinteze de novo omega-3 masnih kiselina, koje također mogu zadovoljiti zahtjeve akvakulture za masnim kiselinama.

S početkom industrijske proizvodnje mikroalgi, njihova upotreba u hrani za akvakulturu se ubrzala. Među morskim mikroalgama, *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis sp.* i *Schizochytrium sp.* smatraju se obećavajućim u hrani za akvakulturu. Navodi se da je *Isochrysis sp.* mikroalge mogu biti dobra alternativa FMFO-u u prehrani kalifornijske pastreve i mogu se koristiti kao dodaci omega-3 i DHA u prehrani (Sarker i sur., 2020.). Nedavno su neke tvrtke za hranu za akvakulturu počele proizvoditi ulje bogato DHA od *Schizochytrium sp.* za hranu lososa (Tocher i sur., 2020.). Trenutačni iznimno visoki troškovi proizvodnje mikroalgi sprječavaju njihovu široku upotrebu u akvakulturi danas (Nagappan i sur., 2021.).



Slika 2. Uloge mikroalgi povezane s akvakulturom. ([Biorender.com](https://www.biorender.com)) (Wu i HU, 2023.)

Morske alge (makroalge)



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

Posljednjih godina morske alge su dobile na važnosti zbog svoje bioremedijacijske značajke koja osigurava visoko održivu proizvodnju. Sadržaj hranjivih sastojaka u morskim algama varira ovisno o vrsti morskih algi, kao što su crvene, zelene i smeđe, te godišnjem dobu, s udjelom proteina od 6-38% u crvenim algama, 3-35% u zelenim algama i 2-17% u smeđim morskim algama. Razine lipida također su u rasponu od <1-13%, <1-3% i <1-10% (Nagappan i sur., 2021). Većina vrsta ima proteine bogate esencijalnim aminokiselinama i sadrži velike količine esencijalnih omega-3 HUFA i PUFA. Sadržaj ugljikohidrata obično je najveća komponenta (15-65%), ovisno o vrsti (Nagappan i sur., 2021). Količina sirovih vlakana, odnosno polisaharida, iznosi između 25-75% njegove suhe tvari i karnivori je ne mogu lako probaviti.

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

Kvasci

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



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Bakterije

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

Iako su bakterijski proteini privlačni za buduću hranu za akvakulturu, imaju poteškoća kao što su troškovi proizvodnje i globalno usvajanje kao hrane za ribe (Sarker i sur., 2023.).

2.1.5. Kukci kao hrana u akvakulturi

Industrija hrane za akvakulturu traži alternative FMFO-u. U tom kontekstu, kukci mogu biti održivi izvor proteina za akvakulturu koristeći otpad od hrane. Utvrđeno je da se najmanje 16 od približno 1 milijun poznatih vrsta kukaca u svijetu može koristiti kao alternativni izvori proteina u akvakulturi (Guerreiro i sur., 2020.). Osmam vrsta kukaca pokazalo je vrlo obećavajuće rezultate (Alfiko i sur., 2022). Među njima su najvažnije vrste kukaca kao što su svilena buba (*Bombyx mori*), *Hermetia illucens*, *Musca domestica*, *Tenebrio molitor* i cvrčci. Navodi se da ove vrste kukaca imaju visoke stope bjelančevinu u rasponu od 42 do 60% i da su usporedive s ribljim brašnom i sojinim brašnom u smislu esencijalnih aminokiselina (Allegretti i sur., 2017). Prednost hrane na bazi kukaca nije samo količina hranjivih tvari koje sadrže, već i smanjeni utjecaj na okoliš u smislu visoke učinkovitosti pretvorbe otpada i pretvorbe nusproizvoda u vrijedne izvore hrane.

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



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

2.1.6. Niskotrofične morske životinje

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

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

Morski amfipodi su red malih, uglavnom bentoskih rakova s više od 10.000 zabilježenih vrsta. Imaju potencijal da se koriste kao alternativni izvor žive hrane za akvakulturu glavonožaca, kozica i morskih konjića, a također i kao djelomična zamjena za riblje brašno u akvakulturi riba i školjkaša (Ashour i sur., 2021.). Morski amfipodi sadrže visoku razinu proteina, PUFA (EPA, DHA) i aminokiselina.

Mnogočetinaši su globalno rasprostranjeni pridneni hranitelji i bioremedijatori koji konzumiraju alge i raspadajuće ili rasipane organske tvari i pretvaraju ih u vrijedne hranjive tvari. Mnogočetini su važan plijen za komercijalno važne ribe i rakove (Khan i sur., 2018). Tradicionalno se koriste kao živi ribarski mamac ili kao visokokvalitetni izvor hrane (Pombo i sur., 2020.). Sadrže velike količine proteina (55-60% suhe mase), lipida (12-28% suhe težine) i PUFA, popraćene dobro uravnoteženim aminokiselinskim, vitaminskim i mineralnim profilima (Wang i sur., 2019).



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

Slika 3. Procjena kvalitativnog potencijala alternativnih sastojaka za hranu za akvakulturu (prilagođeno iz Shah al., 2023)

2.2. Smanjenje utjecaja hrane za životinje u akvakulturi na okoliš

U sektoru akvakulture hrana za životinje čini približno 40-60% troškova, a bjelančevine (riblje brašno) su najskuplje hranjive tvari. 70% FMFO-a koji se koristi za zadovoljavanje potreba vodenih organizama dolazi od ribolova. Ova situacija stvara veliki pritisak na ribarstvo i negativno utječe na njegovu održivost.

2.2.1. Pitanja akvakulture i održivosti

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

1. *Probavljivost sastojaka hrane za životinje*: Probavljivost sastojaka hrane za akvakulturu važan je parametar za formuliranje ekonomski održive i ekološki održive hrane za životinje. Potrebno je utvrditi probavljivost sastojaka. Tako se mogu smanjiti troškovi



hrane za životinje, onečišćenje hranjivim tvarima kao što su emisije eutrofikacije fosfora i dušika te poboljšati stope konverzije hrane.

2. *Omjer konverzije hrane za životinje (FCR):* Ekonomska prednost održive proizvodnje hrane za životinje koja koristi alternativne sastojke uglavnom je posljedica nižeg FCR-a. FCR je dobar pokazatelj ekološke učinkovitosti akvakulture jer pruža naznaku mogućih negativnih posljedica proizvodnje otpadnog fosfora i dušika u vodnom okolišu, kao što su eutrofikacija, staklenički plinovi, gubitak biološke raznolikosti i utjecaji na druge ekosustave. Međutim, FCR-ovi u akvakulturi smanjili su se s oko 3 na oko 1,35 u akvakulturi i s oko 2-2,25 na oko 0,9-1,2 u uzgoju lososa, uglavnom zbog boljih formulacija hrane od 1970. (Sarker i sur., 2023.).
3. *Procjena životnog ciklusa (LCA) za mjere utjecaja na okoliš:* LCA se može koristiti za mjerenje utjecaja prehrambenih sustava na okoliš za mjerenje utjecaja akvakulture na okoliš. Mogu se procijeniti kategorije utjecaja na okoliš, uključujući održivi razvoj hrane za životinje, korištenje alternativnih sastojaka, učinkovito korištenje resursa kao što su zemljište, voda i gnojivo, emisije globalnog zagrijavanja, emisije eutrofikacije, gubitak biološke raznolikosti i negativne vanjske učinke kao što je zakiseljavanje oceana (Sarker i sur., 2011.). Potrebno je vidjeti LCA utjecaje visokokvalitetne proizvodnje novih proteina i masti na FMFO u hrani za životinje.

2.2.2. Održivost proizvodnje vodene hrane

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



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

biogospodarstvo dobiva na važnosti za budućnost industrije hrane za životinje u akvakulturi (Bunting, 2021.).

3. Prakse upravljanja hranom

3.1. Precizne tehnike hranjenja

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

3.1.1. Hranjenje na temelju mikrobioma

Mikrobiom je još uvijek nešto poput "*crne kutije*" u prehrani u akvakulturi. U posljednjih 5 godina došlo je do porasta znanstvenih studija koje ispituju crijevni mikrobiom u kontekstu akvakulture. Nove tehnologije genetskog sekvenciranja omogućile su mapiranje mikrobnih zajednica koje žive u crijevima više od 20 vrsta uzgojenih riba. U budućnosti će sastav crijevnih mikrobnih zajednica, posebno njihovih funkcija ili funkcionalnih ishoda u crijevima, biti područje za daljnja istraživanja. Ovaj pomak će rasvijetliti tekuća istraživačka pitanja kao što je veza između mikrobne raznolikosti i proizvodnje metabolita te će omogućiti industriji da uspostavi osnovne metrike za zdravlje crijeva. Usredotočenost na funkciju crijevnog mikrobioma također će dovesti do poboljšanja probavljivosti hranjivih tvari i performansi riba (Howell, 2022.). U okviru sjecišta genetike i prehrane, genetska selekcija u akvakulturi više ne cilja samo na otpornost na bolesti ili poboljšani rast, već i na iskorištavanje hranjivih tvari. To će precizne tehnike hranjenja temeljene na njihovim genetskim karakteristikama učiniti još važnijima.

3.1.2. Neto formulacija hrane za životinje koja se temelji na energiji

Sljedeća faza precizne prehrane nadilazit će zamjenu FMFO-a iz ribarstva alternativama i uključivat će korištenje svih sastojaka hrane na fleksibilan i održiv način. U akvakulturi se formulacija hrane uglavnom temelji na probavljivoj energiji (DE). U ovom se sustavu pretpostavlja da se energija koristi na standardni način za rast. Glavni razlog za to je što je teško točno izmjeriti gubitak nefekalne energije kod riba u usporedbi s kopnenim životinjama. Stoga, ako se može odrediti, korištenje vrijednosti metabolizirane energije (ME) i neto energije (NE) umjesto vrijednosti DE za hranu za akvakulturu pružit će značajne prednosti (Groot i sur., 2021.). Kako bi se ovaj pomak ostvario i održivije koristili sastojci hrane, industrija bi mogla usvojiti formulacije



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

hrane za životinje koje se usredotočuju na *neto energiju*, a ne na *probavljivu* energiju. Ključna razlika između ova dva sustava je u tome što probavljivi energetska sustav pretpostavlja da ribe koriste sve prehrambene makronutrijente na isti način, dok neto energetska sustav pretpostavlja da se proteini, masti i ugljikohidrati u ribljaj prehrani koriste različito. Posljednjih godina nutricionisti za akvakulturu bili su relativno uspješni u razvoju modela neto energije za različite vrste riba (Howell, 2022.).

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

3.1.3. Formulacija hrane za životinje s više ciljeva (MO)

Formulacija MO hrane, koja ima za cilj kompromis između nižih troškova i manjih utjecaja na okoliš, može se smatrati obećavajućim rješenjem za smanjenje ekološkog otiska proizvodnje akvakulture (Wilfart i sur., 2023.). Nedavno su Garcia-Launay i sur., (2018) razvili *formulaciju s više ciljeva (MO)* koja koristi ograničenja najjeftinije formulacije (hranjive tvari i stope dodavanja sastojaka hrane za životinje) i izračunava funkciju MO koja uključuje i troškove hrane za životinje i pokazatelje utjecaja na okoliš dobivene LCA-om (tj. klimatske promjene, korištenje neobnovljive energije, potražnja P, zauzimanje zemljišta). Međutim, na rast ribe može uvelike utjecati vrsta sirovih sastojaka hrane. Na primjer, zamjena svih FMFO-a sirovim biljnim sastojcima smanjila je rast kalifornijske pastrve za 30% (Lazzarotto i sur., 2018.). Razvijena je metoda formulacije hrane za životinje s više ciljeva koja uzima u obzir i troškove i utjecaje na okoliš (procijenjene LCA) krmne smjese. U prvom koraku, formulacija s najnižim troškovima pruža osnovnu vrijednost za troškove hrane za životinje i potencijalne učinke po kilogramu hrane za životinje. U drugom, minimizirana MO funkcija uključuje normalizirane vrijednosti troškova hrane i utječe na klimatske promjene, potražnju P, potražnju za neobnovljivom energijom i zauzetost zemljišta. Dodatni čimbenik odmjerava relativni utjecaj ekonomskih i okolišnih ciljeva.

Potencijal metode pripreme MO hrane procijenjen je korištenjem dva scenarija formulacije hrane za svinje, brojlerne i mlade bikove. U usporedbi s osnovnom hranom, utvrđeno je da MO formulirana hrana ima manji utjecaj na okoliš (-2 do -48%) i umjereno višu cijenu (1-7%) u oba proučavana scenarija, osim za zauzimanje zemljišta za tovne piliće. Razvijena metoda nadopunjuje druge strategije i trebalo bi je istražiti u budućnosti kako bi se optimizirao cijeli sustav životinjske



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

proizvodnje kako bi se značajno smanjili povezani utjecaji (Garcia-Launay i sur. 2018). Formulacija MO može se koristiti kao koristan alat za smanjenje ekološkog otiska proizvodnje akvakulture bez ugrožavanja performansi životinja ili nužnog povećanja troškova proizvodnje (Wilfart i sur., 2023.).

3.1.4. Tehnologije prethodne obrade i fermentirana hrana za životinje za hranidbu akvakulture

Biljna hrana često se koristi kao glavni izvor proteina u hrani za akvakulturu zbog svoje široke dostupnosti i niske cijene. Međutim, obično sadrže visoke razine neškrobnih polisaharida (NSP), što ograničava njihovu upotrebu u hrani za akvakulturu, posebno za karnivorne ribe. Također imaju nisku ukusnost, neuravnotežene profile aminokiselina i sadrže antinutritivne čimbenike (ANF), koji ograničavaju njihovu upotrebu i povećavaju proizvodnju otpada. Stoga je učinkovito korištenje ovih sastojaka u akvakulturi od velikog interesa.

Fermentacija hrane za životinje isplativ je tehnološki proces koji može smanjiti razinu ANF-ova uz poboljšanje probavljivosti hranjivih tvari i proizvodnje različitih bioaktivnih spojeva, povećavajući nutritivnu vrijednost sastojaka hrane u hrani za akvakulturu. Fermentaciju u čvrstom stanju uglavnom karakterizira upotreba mikroorganizama kao što su nitaste gljive koje učinkovito prodiru u supstrat kroz nisku slobodnu vodu i rast hifa (Šelo i sur., 2021.). Stoga se može fermentirati mikroorganizmima kao što su *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* i *Bacillus licheniformis* i koristiti u čvrstom ili vlažnom stanju. Ovi organizmi mogu utjecati na hranu proizvodeći različite enzime kao što su fitaze, lipaze, proteaze i karbohidraze kao što su celulaze i ksilanaze. Gljive se posebno definiraju kao obogaćivanje lignoceluloznih materijala mikrobnim proteinima i enzimima. Na taj se način smanjuje sadržaj sirovih vlakana i povećava se topljivost sirovih proteina, topljivost proteina i probavljivost proteina i vlakana (Godoy i sur., 2018.), što povećava nutritivnu vrijednost biljne hrane za upotrebu u akvakulturi. Ako se želi stvoriti fermentirana hrana u čvrstom stanju, fermentirana smjesa se ostavi da se osuši na temperaturi i u okruženju koje neće oštetiti hranjivu tvar (Vieira i sur., 2023.; Zengin i sur., 2022).

4. Ublažavanje učinaka zakiseljavanja oceana

Oceani su prirodni karbonatni puferski sustavi i djeluju kao ponor ugljika u okolišu, mnogo veći od atmosferskog i kopnenog sadržaja ugljika. Ocean je izvrstan tampon za neutraliziranje malih promjena u svom sastavu. Kako se više atmosferskog CO₂ otapa u oceanskoj vodi, ugljik se



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

oslobađa iz oceanskog ponora ugljika, čineći oceane kiselijima (Ebenezar i sur., 2023.). Oceani apsorbiraju CO₂ iz atmosfere, djelujući kao tampon za atmosferske razine CO₂. Ako oceani apsorbiraju više CO₂, to dovodi do smanjenja pH morske vode, koncentracije karbonatnih iona i minerala kalcijevog karbonata (CaCO₃), stvarajući situaciju koja se naziva "*zakiseljavanje oceana*" (Reid i sur., 2019.).

Budući da će doći do istodobnog povećanja CO₂ (smanjeni pH i zasićenost aragonitom) i temperature zajedno s promjenama *saliniteta* i, u nekim slučajevima, smanjenim kisikom (Boyd i sur. 2015). Zakiseljavanje oceana i temperatura su međusobno povezani. S obzirom na potencijal za negativne sinergije, povećanje temperature smatra se "*zlim blizancem*" zakiseljavanja oceana. Povećanje razine kiselosti u morskoj vodi također negativno utječe na fiziologiju i metabolizam vodenih vrsta narušavajući mehanizme međustaničnog transporta. Zabilježeno je da ličinke izložene morskoj vodi s nižim pH imaju niži pH želuca, što dovodi do smanjene probavne učinkovitosti i veće potrošnje hrane (Stumpp i sur. 2013). Topli klimatski uvjeti također bi iscrpili kisik u vodi i rezultirali smanjenjem fitoplanktona. Plankton igra važnu ulogu u ublažavanju svjetske klime apsorpcijom emisija CO₂. Fitoplankton čini polovicu globalne fotosinteze i u velikoj mjeri sprječava globalno zagrijavanje (Huertas i sur., 2011).

4.1. Puferska sredstva za ublažavanje zakiseljavanja oceana

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

Puferska sredstva su:

- *Alge* smanjuju zakiseljavanje oceana i neutraliziraju emisije. *Morske alge*, uključujući alge, također smanjuju zakiseljavanje oceana uklanjanjem ugljičnog dioksida iz vode i djeluju kao lokalno sredstvo za "puferiranje" koje koristi mnogim morskim vrstama. Morske alge također proizvode otopljeni kisik, smanjujući širenje "mrtvih zona" u vodi. Uzgoj morskih algi velikih razmjera također se istražuje kao sredstvo za uklanjanje i sekvencijaciju ugljičnog dioksida iz dubokog oceana (NOAA Fisheries, 2022.).
- *Anorganski puferi*: To su obično spojevi kao što su natrijev bikarbonat (NaHCO₃), kalcijev karbonat (CaCO₃) ili magnezijev hidroksid (Mg(OH)₂), koji se obično koriste za održavanje pH stabilnosti.



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

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

4.2. Prehrambene strategije za ublažavanje adifikacije oceana

U akvakulturi je poboljšanje otpornosti na kisele uvjete važno pitanje, posebno s obzirom na zakiseljavanje oceana, za razvoj strategija hrane i hranjenja za održivu akvakulturu (Parker i sur., 2024.). To može negativno utjecati na morski život, posebno vrste koje ovise o stabilnim razinama pH za pravilan rast, razvoj i zdravlje, poput riba, školjaka i rakova. Treba razviti strategije hranjenja i hranjenja koje povećavaju izdržljivost, poboljšavaju zdravlje i povećavaju otpornost na stres.

Neke strategije hranjenja za ublažavanje zakiseljavanja su:

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

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



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

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

5. *Antioksidansi i fitokemikalije*: U zakiseljenim okruženjima, vrste imaju tendenciju nakupljanja reaktivnog kisika, uzrokujući oksidativni stres. Dodavanje prirodnih antioksidansa, kao što su karotenoidi i polifenoli, u hranu za životinje može pomoći u ublažavanju oksidativnog oštećenja i povećanju otpornosti.

5. Poboljšanje učinkovitosti i probavljivosti hrane

5.1. Obrada ekstruzijom

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

5.2. Korištenje enzimskih aditiva

Korištenje enzimskih aditiva za poboljšanje probavljivosti sastojaka hrane i poboljšanje apsorpcije hranjivih tvari, čime se maksimizira rast i zdravlje u promjenjivim uvjetima okoliša, ključno je za hranjenje u akvakulturi. Konkretno, dodavanje enzima u ekstrudiranu hranu za ribe kako bi se poboljšala probavljivost fosfora, ugljikohidrata i proteina u hrani može poboljšati održivost okoliša osiguravajući da se manje spojeva ispušta iz ribe u vodu. U tom kontekstu također je važno razviti



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

hranu za životinje koja održava svoju probavljivost unatoč promjeni temperature vode zbog visokih ili niskih temperatura vode s globalnim zagrijavanjem.

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

5.3. Funkcionalni dodaci hrani za životinje

Funkcionalni dodaci hrani za životinje su dodaci koji se ugrađuju u formulacije hrane kako bi se zadovoljili osnovni prehrambeni zahtjevi konvencionalne hrane za životinje, kao i poboljšali rast i zdravlje akvakulture. Njihova upotreba u formulaciji hrane za akvakulturu pruža prednosti kao što su poboljšanje zdravlja crijeva i korisnih crijevnih bakterija, povećanje proizvodnje enzima i poticanje apetita, što zauzvrat dovodi do poboljšanih performansi rasta. Osim toga, ovi dodaci hrani za životinje mogu smanjiti negativan ekološki otisak akvakulture poboljšanjem kvalitete vode i upotrebom alternativnih proteina u hrani za akvakulturu (Onomu i Okuthe, 2024.).

Korištenje kopnenih, biljnih proteina kao djelomične ili potpune zamjene za riblje brašno zahtijeva dodatke hrani. Antibiotici i kemoterapeutici koji se koriste u akvakulturi uzrokuju sojeve bakterija otporne na antibiotike i uklanjaju nenamjerne prirodne mikrobe, kao i probleme s ostacima antibiotika na bazi proizvoda kod ljudi. S druge strane, probiotici, prebiotici i fitogenici kao funkcionalni dodaci hrani za životinje mogu se koristiti za prevenciju/smanjenje bolesti i jačanje imuniteta domaćina (Van Doan i sur., 2020.). Međutim, postoji manje informacija o funkcionalnim dodacima hrani za životinje nego kod drugih životinja, posebno u pogledu njihovog odnosa s održivošću akvakulture (Onomu i Okuthe, 2024.).

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

1. Povećana iskorištenost hrane za životinje
2. Poboljšano održivo korištenje resursa



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

3. Povećana otpornost na bolesti i imunitet
4. Povećana otpornost na parazite
5. Poboljšana kvaliteta vode

5.3.1. Probiotici (mikrobna sredstva iz izravne hrane: DFM), prebiotici i simbiotici

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

Probiotici

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

Bakterijski patogeni postaju sve otporniji na antimikrobne lijekove, pesticide i dezinficijense koji se koriste u kontroli vodenih bolesti. Iz tog razloga, sve je veća potražnja za studijama o probioticima u akvakulturi radi osiguravanja ekološki prihvatljive održive akvakulture kao alternative antibioticima. Nažalost, sastojci biljnog podrijetla mogu imati nekoliko negativnih učinaka na prehranu u akvakulturi (Nielsen i sur., 2022.). Probiotici stabiliziraju mikrobnu populaciju gastrointestinalnog trakta ribe eliminacijom patogenih mikroba i povećanom probavljivošću i bioraspoloživošću hranjivih tvari (Oscar i sur., 2020.).

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

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

Izoliran je i procijenjen veliki broj probiotičkih mikroorganizama za upotrebu u akvakulturi u prevenciji i kontroli zaraznih bolesti uzgajanih organizama. Rezultati dviju studija koje su koristile



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

dva komercijalna probiotika za procjenu učinaka probiotika na stok ženki kalifornijske pastrve (Akbari Nargesi i sur., 2020.) i nilsku tilapiju (*Oreochromis niloticus*) (El-Kady i sur., 2022.) pokazali su da probiotici mogu poboljšati reproduktivne parametre, smanjiti ukupni dušik i amonijak te povećati performanse rasta i iskorištenost hrane. u usporedbi s kontrolom.

Prebiotici i simbiotici

Prebiotici su neprobavljivi dodaci hrani, koji se uglavnom sastoje od oligosaharida koji stimuliraju i metaboliziraju korisne mikroorganizme u gastrointestinalnom traktu, a istovremeno poboljšavaju zdravlje domaćina (Bozkurt i sur., 2014). Da bi se dodatak hrani za životinje kategorizirao kao prebiotik, mora doći do debelog crijeva bez probave, biti otporan na želučanu kiselinu, hidrolizu probavnim enzimima i apsorpciju gastrointestinalnog trakta (Davani-Davari i sur., 2019). Korist prebiotika kao dodataka hrani za životinje povezana je s nusproduktima dobivenim tijekom fermentacije bakterijama u crijevima. Glavne vrste prebiotika koji se koriste u akvakulturi su manan oligosaharid (MOS), fruktooligosaharidi (FOS), galaktooligosaharid (GOS), arabinoksilan oligosaharid (AXOS), inulin i β -glukan.

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

Fitogenici

Fitogenici su skupina dodataka hrani za životinje dobivenih iz lišća, stabljika, korijena, sjemenki, gomolja, plodova, grmlja i začina. Fitogenici općenito potiču apetit, jačaju korisne crijevne bakterije i koriste se kod domaćih životinja zbog svojih antioksidativnih, antimikrobnih, antikancerogenih, analgetskih i antiparazitskih učinaka. Budući da sadrže aktivne spojeve, mogu imati i toksične učinke. Njihova svojstva i učinkovitost vrlo su varijabilni i razlikuju se ovisno o korištenom dijelu biljke, korištenoj tehnici ekstrakcije i koncentraciji, sezoni berbe i zemljopisnom položaju (Onomu i Okuthe, 2024.).



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

U studiji, dva fitogena aditiva za hranu, jedan bogat karvakrolom, a drugi bogat timelom, poboljšali su učinkovitost hrane u usporedbi s kontrolnom prehranom i povećali antioksidativne zaštitne kapacitete kod kalifornijske pastrve (*Oncorhynchus mykiss*) (Giannenas i sur., 2012). Također je reguliran crijevnim mikrobnim zajednicama negativnim utjecajem na ukupne anaerobe. Studija Abdel-Latifa i sur., (2020) ispitala je primjenu dijetalnog esencijalnog ulja majčine dušice (OEO) na šarana (*Cyprinus carpio* L.). Kada se uspoređuju ribe hranjene OEO s kontrolnom skupinom, pokazali su značajno poboljšanje crijevnih morfometrijskih parametara. (2022) ispitali su učinke kvercetina, eteričnog ulja majčine dušice i vitamina C na prehranu običnog šarana (*Cyprinus carpio*). Otkrili su da su ribe hranjene kvercetinom imale višu razinu antioksidansa u serumu i jetri, uključujući katalazu, superoksid dismutazu, glutation peroksidazu i glutation reduktazu, na kraju 60-dnevnog ispitivanja hranjenja. Učinke ekstrakta mažurana na običnu šaransku ribu, *Cyprinus carpio*, ispitali su Yousefi i sur., (2021). Maksimalna ukupna masa, debljanje i specifična stopa rasta, kao i najniži FCR, viđeni su kada je u prehranu dodano 200 mg kg⁻¹ ekstrakta mažurana.

Antistresni dodaci hrani

Najvažniji učinak klimatskih promjena je stres koji će se stvoriti u akvakulturi zbog izvora iz okoliša. Posljednjih godina sve je više studija o smanjenju stresa kod riba. Osim razvoja novih tehnologija za poboljšanje okolišnih uvjeta akvakulture, važno je uključiti neke korisne aditive u njihovu hranu kako bi se smanjio odgovor na stres na tipične čimbenike stresa. Dubinski je proučavana upotreba različitih aditiva u ribljor prehrani za smanjenje reakcija na stres. U tim studijama zabilježene su imunološke, prehranbene i metaboličke promjene, uvijek povezane s endokrinim procesima. Biokemijska priroda i fiziološka funkcionalnost ovih dodataka hrani za životinje snažno utječu na odgovor na stres i zapravo mogu djelovati kao neurotransmiteri ili prekursori hormona, energetske supstrati, kofaktori i drugi bitni elementi, što zauzvrat stvara multisistemske i multiorganske odgovore (Herrera i sur., 2019.).

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

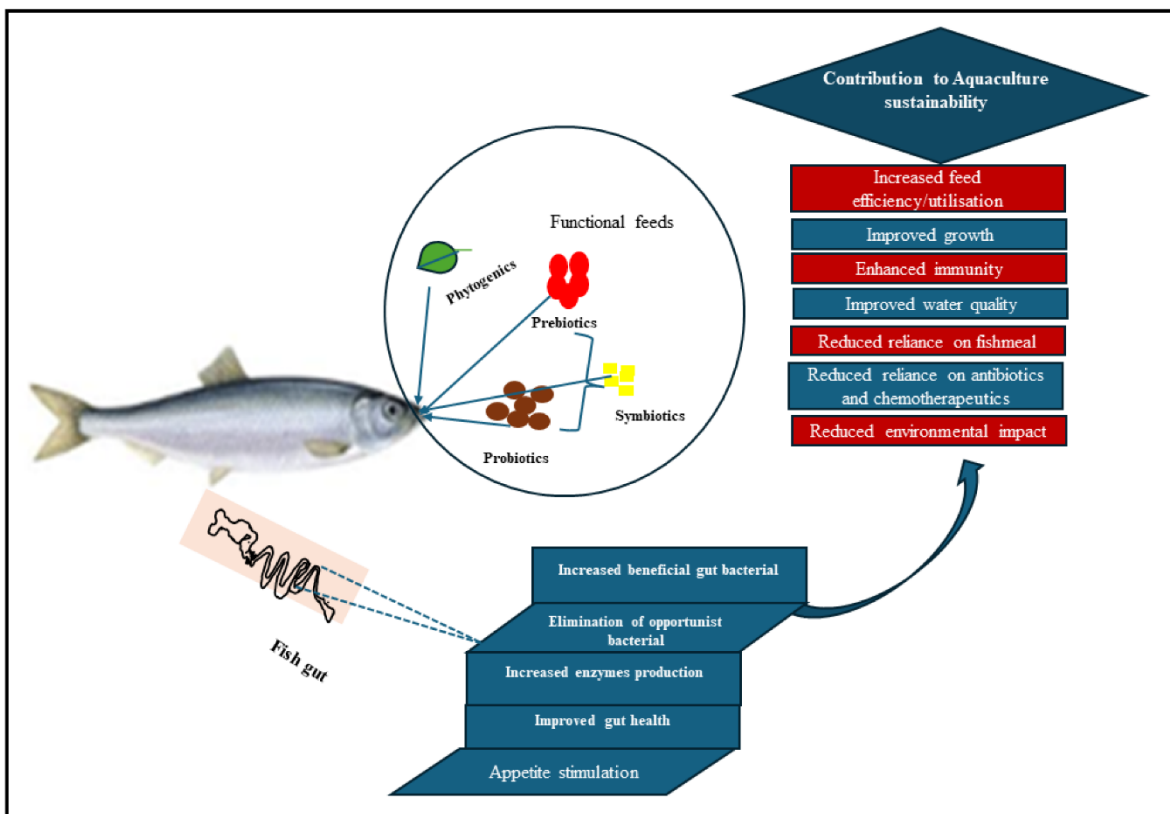


Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247



Slika 4. Učinci funkcionalnih dodataka hrani za životinje u akvakulturi (prilagođeno iz Onomu i Okuthe, 2024.)

Sažetak

Globalno zagrijavanje može povećati temperaturu vode, povećavajući brzinu metabolizma vrsta u akvakulturi, zahtijevajući promjene u formulaciji hrane kako bi se zadovoljile povećane potrebe za hranjivim tvarima. Potrebno je prilagoditi omjere proteina, lipida i ugljikohidrata u hrani za životinje kako bi se prilagodili promjenjivim metaboličkim potrebama i osigurali optimalan rast i zdravlje vrste. Budući da su riblji stokovi koji se koriste za riblje brašno i riblje ulje pod utjecajem klimatskih promjena, alternativni izvori proteina kao što su brašno od kukaca, alge i biljni proteini postaju važni za održivu hranu za akvakulturu. Potrebne su inovacije u sastavu hrane za životinje kako bi se smanjio ekološki otisak, kao što je korištenje sastojaka iz otpada i optimizacija omjera pretvorbe hrane. Primjena naprednih tehnologija hranjenja kao što su automatizirane hranilice i



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

praćenje u stvarnom vremenu važna je za optimizaciju distribucije hrane, smanjenje otpada i osiguravanje učinkovitog korištenja resursa. Učestalost i količine hranjenja treba modificirati kako bi odgovarale promjenjivom apetitu i stopama rasta vrsta u promjenjivim temperaturnim uvjetima. Puferirajuća sredstva treba dodati u formulacije hrane za životinje kako bi se ublažili učinci zakiseljavanja oceana na probavnu fiziologiju vrsta u akvakulturi. Korisno je razviti strategije hranjenja koje povećavaju otpornost vrsta na kisele uvjete, kao što je uključivanje minerala i vitamina koji podržavaju otpornost na stres. Korištenje enzimskih aditiva za poboljšanje probavljivosti sastojaka hrane i poboljšanje apsorpcije hranjivih tvari od vitalnog je značaja, čime se maksimizira rast i zdravlje u promjenjivim uvjetima okoliša. Dodavanje korisnih mikroorganizama i prebiotičkih spojeva u hranu za životinje za podršku zdravlju crijeva, jačanje imuniteta i povećanje ukupne učinkovitosti hrane u suočavanju sa stresorima povezanim s globalnim zatopljenjem povećat će učinkovitost.

Literatura

Aasen, I. M., Sandbakken, I. S., Toldnes, B., Roleda, M. Y., & Slizyte, R. (2022). Enrichment of the protein content of the macroalgae *Saccharina latissima* and *Palmaria palmata*. *Algal research*, 65, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102727>

Abdel-Latif, H. M., Abdel-Tawwab, M., Khafaga, A. F., & Dawood, M. A. (2020). Dietary oregano essential oil improved the growth performance via enhancing the intestinal morphometry and hepato-renal functions of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture*, 526, 735432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735432>

Ahmad, A., W. Hassan, S., & Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521-9547. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>

Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental management*, 63, 159-172. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3>

Akbari Nargesi, E., Falahatkar, B., & Sajjadi, M. M. (2020). Dietary supplementation of probiotics and influence on feed efficiency, growth parameters and reproductive performance in female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock. *Aquaculture Nutrition*, 26(1), 98-108. <https://doi.org/10.1111/anu.12970>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Albrektsen, S., Kortet, R., Skov, P. V., Ytteborg, E., Gitlesen, S., Kleinegris, D., ... & Øverland, M. (2022). Future feed resources in sustainable salmonid production: A review. *Reviews in aquaculture*, 14(4), 1790-1812. <https://doi.org/10.1111/raq.12673>

Alfiko, Y., Xie, D., Astuti, R. T., Wong, J., & Wang, L. (2022). Insects as a feed ingredient for fish culture: Status and trends. *Aquaculture and fisheries*, 7(2), 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.10.004>

Allegretti, G., Schmidt, V., & Talamini, E. (2017). Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production. *World's poultry science journal*, 73(4), 928-937. <https://doi.org/10.1017/S004393391700054X>

Amin, M. N., Barnes, R. K., & Adams, L. R. (2014). Effect of temperature and varying level of carbohydrate and lipid on growth, feed efficiency and nutrient digestibility of brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill, 1814). *Animal feed science and technology*, 193, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.04.016>

Amin, M. N., Carter, C. G., Katersky Barnes, R. S., & Adams, L. R. (2016). Protein and energy nutrition of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) at optimal and elevated temperatures. *Aquaculture nutrition*, 22(3), 527-540. <https://doi.org/10.1111/anu.12274>

Alloul, A., Wille, M., Lucenti, P., Bossier, P., Van Stappen, G., & Vlaeminck, S. E. (2021). Purple bacteria as added-value protein ingredient in shrimp feed: *Penaeus vannamei* growth performance, and tolerance against *Vibrio* and ammonia stress. *Aquaculture*, 530, 735788. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735788>

Ang, C. Y., Yong, A. S. K., Azad, S. A., Lim, L. S., Zuldin, W. H., & Lal, M. T. M. (2021). Valorization of macroalgae through fermentation for aquafeed production: A review. *Fermentation*, 7(4), 304. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040304>

Ashour, M., Abo-Taleb, H. A., Hassan, A. K. M., Abdelzaher, O. F., Mabrouk, M. M., Elokaby, M. A., Mansour, A. T. (2021). Valorization use of amphipod meal, *Gammarus pulex*, as a fishmeal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. *Journal of marine science and engineering*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/jmse9121336>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Becker, E. W. (2013). Microalgae for aquaculture: nutritional aspects. *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*, 671-691. ISBN:9780470673898.

Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>

Blacher, E., Levy, M., Tatirovsky, E., & Elinav, E. (2017). Microbiome-modulated metabolites at the interface of host immunity. *The journal of immunology*, 198(2), 572-580. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1601247>

Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Davis, R. P. (2022). The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. *Food security*, 14(3), 805-827. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01246-9>

Bozkurt, M., Aysul, N., Küçükyilmaz, K., Aypak, S., Ege, G., Catli, A. U., ... & Çınar, M. (2014). Efficacy of in-feed preparations of an anticoccidial, multienzyme, prebiotic, probiotic, and herbal essential oil mixture in healthy and *Eimeria* spp.-infected broilers. *Poultry science*, 93(2), 389-399. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03368>

Bunting, M., 2021. Making fish feed greener: by-products the key to a sustainable aquaculture industry. 22 September 2021. <https://disruptr.deakin.edu.au/environment/making-fish-feed-greener-by-products-the-key-to-a-sustainable-aquaculture-industry/>

Cheung, W.W:L., Maire, E., Oyinlola, MA., Robinson, J.P.W., Graham, N.A.J., Lam, V.W.Y., McNeil, M.A., Hicks, C.C. (2023). Climate change exacerbates nutrient disparities from seafood. *Nature Climate Change*, 13: 1242–1249. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01822-1>

Cottrell, R. S., Blanchard, J. L., Halpern, B. S., Metian, M., & Froehlich, H. E. (2020). Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature food*, 1(5), 301-308. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>

Cowieson, A. J., & Ravindran, V. (2008). Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy, minerals and amino acids. *British poultry science*, 49(1), 37-44. <https://doi.org/10.1080/0007166070181298>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S. J., Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>

Delamare-Deboutteville, J., Batstone, D. J., Kawasaki, M., Stegman, S., Salini, M., Tabrett, S., Hülsen, T. (2019). Mixed culture purple phototrophic bacteria is an effective fishmeal replacement in aquaculture. *Water research X*, 4, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100031>

Demir, E., Sarica, Ş., Özcan, M. A., & Sui Mez, M. (2003). The use of natural feed additives as alternatives for an antibiotic growth promoter in broiler diets. *British poultry science*, 44(S1), 44-45. <https://doi.org/10.1080/713655288>

Ding, D. S., Wang, S. H., Sun, W. T., Liu, H. L., & Pan, C. H. (2022). The effect of feeding on *briareum violacea* growth, survival and larval development under temperature and salinity stress. *Biology*, 11(3), 410. <https://doi.org/10.3390/biology11030410>

Ebenezzar, S., Singh, D. K., Sahoo, S., Prabu Linga, D., & Pal, A. K. (2023). Outlook of Climate Change and Fish Nutrition. Editors: Archana Sinha, Shivendra Kumar, Kavita Kumari. Springer, ISBN 978-981-19-5499-3, (eBook).

Eissa, E. S. H., Ahmed, R. A., Abd Elghany, N. A., Elfeky, A., Saadony, S., Ahmed, N. H., Sakr, S. E. S., Dayrit, G. B., Tolenada, C. P. S., Atienza, A. A. C., Mabrok, M., & Ayoub, H. F. (2023). Potential symbiotic effects of β -1,3 glucan, and fructooligosaccharides on the growth performance, immune response, redox status, and resistance of pacific white shrimp, *litopenaeus vannamei* to *Fusarium solani* infection. *Fishes*, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/fishes8020105>

Elabd, H., Wang, H. P., Shaheen, A., Yao, H., & Abbass, A. (2016). Feeding Glycyrrhiza glabra (liquorice) and Astragalus membranaceus (AM) alters innate immune and physiological responses in yellow perch (*Perca flavescens*). *Fish & shellfish immunology*, 54, 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.04.024>

El-Kady, A. A., Magouz, F. I., Mahmoud, S. A., & Abdel-Rahim, M. M. (2022). The effects of some commercial probiotics as water additive on water quality, fish performance, blood biochemical parameters, expression of growth and immune-related genes, and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 546, 737249. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737249>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

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

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

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

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

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

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

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

Ghafariarsani, H., Hoseinifar, S. H., Javahery, S., & Van Doan, H. (2022). Effects of dietary vitamin C, thyme essential oil, and quercetin on the immunological and antioxidant status of



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

common carp (Cyprinus carpio). *Aquaculture*, 553, 738053.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738053>

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

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

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

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

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

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

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

Herrera, M., Mancera, J. M., & Costas, B. (2019). The use of dietary additives in fish stress mitigation: comparative endocrine and physiological responses. *Frontiers in endocrinology*, 10, 447. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00447>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Hilborn, R., Banobi, J., Hall, S. J., Pucylowski, T., & Walsworth, T. E. (2018). The environmental cost of animal source foods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(6), 329-335. <https://doi.org/10.1002/fee.1822>

Hanachi, P., Karbalaeei, S., Walker, T. R., Cole, M., & Hosseini, S. V. (2019). Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (*Cyprinus carpio*). *Environmental science and pollution research*, 26, 23777-23787. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05637-6>

Howell, M. (2022). An insider's view of advances in aquaculture nutrition. 23 September 2022. <https://thefishsite.com/articles/an-insiders-view-of-advances-in-aquaculture-nutrition-alltech-coppens>

Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., ... & Strugnell, J. M. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One earth*, 1(3), 316-329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>

Huertas, I. E., Rouco, M., Lopez-Rodas, V., & Costas, E. (2011). Warming will affect phytoplankton differently: evidence through a mechanistic approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1724), 3534-3543. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0160>

Huguet, C. T., Norambuena, F., Emery, J. A., Hermon, K., & Turchini, G. M. (2015). Dietary n-6/n-3 LC-PUFA ratio, temperature and time interactions on nutrients and fatty acids digestibility in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 436, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.11.011>

Idenyi, J. N., Eya, J. C., Nwankwegu, A. S., & Nwoba, E. G. (2022). Aquaculture sustainability through alternative dietary ingredients: Microalgal value-added products. *Engineering microbiology*, 2(4), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100049>

Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current opinion in biotechnology*, 61, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>

Jusadi, D., Ekasari, J., Suprayudi, M. A., Setiawati, M., & Fauzi, I. A. (2021). Potential of underutilized marine organisms for aquaculture feeds. *Frontiers in marine science*, 7, 609471. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.609471>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Khan, M. A., Das, S. K., & Bhakta, D. (2018). Food and feeding habits, gastro-somatic index and gonado-somatic index of *Scylla serrata* from Hooghly-Matlah estuary of West Bengal, India. *Journal of the marine biological association of india*, 60(1), 14. <https://doi.org/10.6024/jmbai.2018.60.1.1994-02>

Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. *PLoS One*, 13(1), e0190730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190730>

Legrand, T. P., Wynne, J. W., Weyrich, L. S., & Oxley, A. P. (2020). A microbial sea of possibilities: current knowledge and prospects for an improved understanding of the fish microbiome. *Reviews in aquaculture*, 12(2), 1101-1134. <https://doi.org/10.1111/raq.12375>

Li, Y., Kortner, T. M., Chikwati, E. M., Belghit, I., Lock, E. J., & Krogdahl, Å. (2020). Total replacement of fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal does not compromise the gut health of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 520, 734967. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734967>

Lock, E. J., Biancarosa, I., & Gasco, L. (2018). Insects as raw materials in compound feed for aquaculture. *Edible insects in sustainable food systems*, 263-276. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_16

Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: prospects and challenges. *Reviews in aquaculture*, 16(2), 818-835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>

Mackenzie, S. G., Leinonen, I., Ferguson, N., & Kyriazakis, I. (2016). Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *British journal of nutrition*, 115(10), 1860-1874. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000763>

Mancuso, T., Pippinato, L., & Gasco, L. (2019). The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. *Calitatea*, 20(S2), 374-381. <https://www.researchgate.net/publication/332504133>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Messeder, T., 2021. Innovation opportunities in European Aquaculture. KTN AgriFood and EIT Food. March 2021.

Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: prospects and challenges. *Reviews in aquaculture*, 16(2), 818-835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>

MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific reports*, 10(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>

Matassa, S., Papirio, S., Pikaar, I., Hülsen, T., Leijenhurst, E., Esposito, G., ... & Verstraete, W. (2020). Upcycling of biowaste carbon and nutrients in line with consumer confidence: the “full gas” route to single cell protein. *Green chemistry*, 22(15), 4912-4929. <https://doi.org/10.1039/D0GC01382J>

Mo, W. Y., Cheng, Z., Choi, W. M., Man, Y. B., Liu, Y., & Wong, M. H. (2014). Application of food waste-based diets in polyculture of low trophic level fish: Effects on fish growth, water quality and plankton density. *Marine pollution bulletin*, 85(2), 803-809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.020>

Nadermann, N., Seward, R. K., & Volkoff, H. (2019). Effects of potential climate change-induced environmental modifications on food intake and the expression of appetite regulators in goldfish. *Comparative biochemistry and physiology part a: molecular & integrative physiology*, 235, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.06.001>

Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., ... & Kumar, G. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of biotechnology*, 341, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>

Nasser, N., Abiad, M. G., Babikian, J., Monzer, S., & Saoud, I. P. (2018). Using restaurant food waste as feed for Nile tilapia production. *Aquaculture research*, 49(9), 3142-3150. <https://doi.org/10.1111/are.13777>

Nathanailides, C., Kolygas, M., Choremi, K., Mavraganis, T., Gouva, E., Vidalis, K., & Athanassopoulou, F. (2021). Probiotics Have the Potential to Significantly Mitigate the



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Environmental Impact of Freshwater Fish Farms. *Fishes*, 6(4), 76. <https://doi.org/10.3390/fishes6040076>

Nielsen, T. B., Würtz, A. M. L., Tjønneland, A., Overvad, K., & Dahm, C. C. (2022). Substitution of unprocessed and processed red meat with poultry or fish and total and cause-specific mortality. *British Journal of Nutrition*, 127(4), 563-569. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001252>

NOAA Fisheries, (2022). Climate Resilience and Aquaculture. Fact Sheet 2022. www.fisheries.noaa.gov/aquaculture

Ojeda, J., 2021. Can sustainable aquaculture help to achieve the UN SDGs? <https://www.eitfood.eu/blog/can-sustainable-aquaculture-help-to-achieve-the-un-sdgs> 17 August, 2021. Officials.

Onomu, A. J., & Okuthe, G. E. (2024). The Role of Functional Feed Additives in Enhancing Aquaculture Sustainability. *Fishes*, 9(5), 167. <https://doi.org/10.3390/fishes9050167>

Oscar, E. V., Joshua, E. O., Felix, E., & Eyerituvie, A. F. (2020). A Review on the Application and Benefits of Probiotics Supplements in Fish Culture. *Oceanography & Fisheries Open Access Journal*, 11(4), 62-65. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2020.11.555817>

Parker, L. M., Scanes, E., O'Connor, W. A., Dove, M., Elizur, A., Pörtner, H. O., & Ross, P. M. (2024). Resilience against the impacts of climate change in an ecologically and economically significant native oyster. *Marine pollution bulletin*, 198, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115788>

Pombo, A., Baptista, T., Granada, L., Ferreira, S. M., Gonçalves, S. C., Anjos, C., ... & Costa, J. L. (2020). Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. *Reviews in aquaculture*, 12(1), 107-121. <https://doi.org/10.1111/raq.12307>

Porteus, C. S., Hubbard, P. C., Uren Webster, T. M., van Aerle, R., Canário, A. V., Santos, E. M., & Wilson, R. W. (2018). Near-future CO₂ levels impair the olfactory system of a marine fish. *Nature climate change*, 8(8), 737-743. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0224-8>

Puvanasundram, P., Chong, C. M., Sabri, S., Yusoff, M. S., & Karim, M. (2021). Multi-strain probiotics: Functions, effectiveness and formulations for aquaculture applications. *Aquaculture reports*, 21, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100905>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Qiu, X., Neori, A., Kim, J. K., Yarish, C., Shpigel, M., Guttman, L., ... & Davis, D. A. (2018). Evaluation of green seaweed *Ulva* sp. as a replacement of fish meal in plant-based practical diets for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Journal of applied phycology*, 30, 1305-1316. <https://www.researchgate.net/publication/320042463>

Ragaza, J. A., Hossain, M. S., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Kotzamanis, Y., ... & Kumar, V. (2021). Brown seaweed (*Sargassum fulvellum*) inclusion in diets with fishmeal partially replaced with soy protein concentrate for Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) juveniles. *Aquaculture nutrition*, 27(4), 1052-1064. <https://doi.org/10.1111/anu.13246>

Rasidi, R., Jusadi, D., Setiawati, M., Yuhana, M., Zairin Jr, M., & Sugama, K. (2021). Dietary Supplementation of humic acid in the Feed of juvenile asian seabass, *Lates calcarifer* to counteract possible negative effects of Cadmium Accumulation on Growth and Fish Well-being when Green Mussel (*Perna viridis*) is used as a Feed ingredient. *Aquaculture research*, 52(6), 2550-2568. <https://doi.org/10.1111/are.15104>

Reid, G.K., Gurney-Smith, H., Marcogliese, D.J., Knowler, D., Benfey, T., Garber, A.F., Forster, I., Chopin, T., Brewer-Dalton, K., Moccia, R.D., Flaherty, M.S., Smith, C.T., de Silva, S., (2019). Climate change and aquaculture: considering biological response and resources. *Aquaculture environment interactions*, 11, 569-602. <https://doi.org/10.3354/aei00332>

Rimoldi S, Torrecillas S, Montero D, Gini E, Makol A, Valdenegro V. V, et al. (2020). Assessment of dietary supplementation with galactomannan oligosaccharides and phytogenics on gut microbiota of European sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) fed low fishmeal and fish oil based diet. *PLoS ONE* 15(4): e0231494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231494>

Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>

Sandblom, E., Gräns, A., Axelsson, M., & Seth, H. (2014). Temperature acclimation rate of aerobic scope and feeding metabolism in fishes: implications in a thermally extreme future. *Proceedings of the royal society b: biological sciences*, 281(1794), 20141490. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1490>



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Sarker, P. K., Fournier, J., Boucher, E., Proulx, E., de la Noüe, J., & Vandenberg, G. W. (2011). Effects of low phosphorus ingredient combinations on weight gain, apparent digestibility coefficients, non-fecal phosphorus excretion, phosphorus retention and loading of large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 168, 241-9. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.086>

Sarker, P. K., Kapuscinski, A. R., McKuin, B., Fitzgerald, D. S., Nash, H. M., & Greenwood, C. (2020). Microalgae-blend tilapia feed eliminates fishmeal and fish oil, improves growth, and is cost viable. *Scientific reports*, 10(1), 19328. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75289-x>

Sarker, P. K. (2023). Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. *Microorganisms*, 11(2), 439. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020439>

Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Koceva Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. (2021). A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>

Sepulveda, J., & Moeller, A. H. (2020). The effects of temperature on animal gut microbiomes. *Frontiers in microbiology*, 11, 384. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00384>

Shahin, S., Okomoda, V. T., Ma, H., & Ikhwanuddin, M. (2023). Sustainable alternative feed for aquaculture: state of the art and future perspective. *Planetary sustainability*, 1(1), 62-96. <https://www.researchgate.net/publication/373874626>

Sharma, J., Singh, S. P., & Chakrabarti, R. (2017). Effect of temperature on digestive physiology, immune-modulatory parameters, and expression level of Hsp and LDH genes in *Catla catla* (Hamilton, 1822). *Aquaculture*, 479, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.05.031>

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

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



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

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

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

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

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

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

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

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

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

Widanarni, W., Taufik, A., Yuhana, M., & Ekasari, J. (2019). Dietary mannan ligosaccharides positively affect the growth, digestive enzyme activity, immunity and resistance against vibrio



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

harveyi of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae. *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 19, 271-278. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_4_01

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

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

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

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

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

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

Rječnik

Akvakultura: Uzgoj i sakupljanje ribe, školjkaša i vodenih biljaka. U osnovi, to je uzgoj u vodi.

DFM-ovi: Mikrobná sredstva iz izravne hrane, kao što su probiotici i kvasci



Funded by
the European Union



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

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

DHA: dokozaheksanska kiselina

EPA: eikozapentanska kiselina

GHG: staklenički plinovi

FER: Omjer učinkovitosti hrane (dobitak/pomak)

FCR: Omjer pretvorbe hrane (pomak/dobitak)

MO prehrana: višeciljna optimizacija nutritivnih, ekoloških i ekonomskih aspekata prehrane

NE: Neto energija

Neto nula: Ravnoteža između količine stakleničkih plinova (GHG) koji se proizvode i količine koja se uklanja iz atmosfere.

LCA: Procjena životnog ciklusa

Prebiotički dodatak: Hrana (obično hrana bogata vlaknima) koja djeluje kao hrana za životinjsku mikrofloru

Probiotički dodatak: Hrana ili dodaci koji sadrže žive mikroorganizme.

PUFA: polinezasićene masne kiseline

SCO: jednostanični organizmi