



Funded by
the European Union



Skaitmeninė mėlynoji karjera įveikus anglies krizę – akvakultūros mokymo programos naujovės [DiBluCa]
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

2 modulis. Akvakultūros poveikis aplinkai pasaulinio atšilimo požiūriu

Prof. dr. Vlasta Bartulović
Doc. dr. Tatjana Dobroslavich
Dubrovniko universitetas, Kroatija

Turinys

Ivadas	2
1. Šiltnamio efektą sukeliančios dujos ir anglies pėdsakas	2
1.1. ŠESD emisijos akvakultūros plėtros kontekste	3
1.2. Pagrindiniai šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltiniai	5
2. Energijos sąnaudos ir tvarumas	6
2.1. Energijos šaltiniai ir jų poveikis aplinkai	6
2.2. Akvakultūros energijos sąnaudos: pagrindiniai aspektai	8
3. Žemės naudojimo ir buveinių pokyčiai	8
4. Pašarų gamyba ir išteklių naudojimas	10
4.1. Akvakultūros pašarai ir alternatyvūs baltymų šaltiniai	10
4.2. Akvakultūros pašarų gamybos poveikis aplinkai	11
4.3. Pašarų parinkimas ir mityba akvakultūroje	12
5. Tarša ir likutinės medžiagos	13
5.1. Maistinių medžiagų išsiskyrimas ir eutrofikacija	15
5.2. Cheminių medžiagų ir antibiotikų naudojimo poveikis	15
Santrauka	16
Literatūra	17



Įvadas

Atsižvelgiant į klimato kaitą, vis didesnį susirūpinimą kelia akvakultūros pramonės poveikis aplinkai. Ši veikla prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijos, buveinių nykimo ir gamtos išteklių išsekvojimo. Tarp pagrindinių ŠESD yra anglies dioksidas (CO_2), metanas (CH_4), azoto oksidas (N_2O) ir fluorintos dujos – šios medžiagos sulaiko šilumą Žemės atmosferoje ir skatina visuotinį atšilimą. Nors CO_2 laikomas pagrindiniu veiksnium, CH_4 yra ypač galingos dujos, kurių emisiją didina tokia žmogaus veikla kaip miškų kirtimas, biomasės deginimas, kasyba ir pramoniniai procesai (Wróbel et al., 2023). Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija (TKKK) yra konstatavusi, kad žmogaus veikla neabejotinai veikia klimatą. Dėl industrializacijos ir urbanizacijos pasiekti rekordiniai ŠESD kiekiai. Didžiausios įtakos tam vis dar turi transporto, energetikos ir žemės ūkio sektoriai – dėl jų veiklos kinta orų modeliai, skatinamas jūros lygio kilimas, mažinama biologinė įvairovė.

Akvakultūra, nors ir labai svarbi pasauliniam apsirūpinimui maistu, taip pat prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo. Šią emisiją didina daug energijos reikalaujanti veikla, žemės paskirties keitimas, pašarų gamyba ir atliekų tvarkymas (MacLeod et al., 2019). Daugelyje regionų akvakultūros veiklai reikalinga elektros energija vis dar gaminama iš iškastinio kuro – ypač ten, kur dominuoja anglis, nafta ar gamtinės dujos (Bujas et al., 2022). Be to, spartus akvakultūros plėtojimas dažnai susijęs su ekologiškai jautrių buveinių, pavyzdžiui, mangrovių ar šlapynių, pažeidimu. Tokie pokyčiai lemia biologinės įvairovės mažėjimą ir ekosistemų degradaciją (Barbier et al., 2011).

Vienas didžiausių akvakultūros poveikio aplinkai šaltinių yra pašarų gamyba. FAO (2022) duomenimis, iki 90 proc. visų ŠESD, susijusių su žuvų auginimu, tenka pašarams. Pašarų sudėtyje esantiems žuvų miltams ir augaliniams ingredientams gauti reikia daug žemės, vandens ir energijos, o tai dar labiau didina spaudimą aplinkai. Be to, akvakultūroje susidaro reikšmingas kiekis atliekų – nesuvalgytų pašarų, išmatų, medžiagų apykaitos produktų bei cheminių medžiagų likučių, kurie gali pabloginti vandens kokybę ir trikdyti ekosistemų veikimą (Wu, 1995; Dalsgaard & Krause-Jensen, 2006; Holmer et al., 2008). Šio poveikio mastas priklauso nuo daugelio veiksnių – ūkio vietos, rūšių, gyvulių tankumo bei pašarų efektyvumo.

Kadangi pasaulinė jūrų gėrybių paklausa toliau auga, pagrindinis iššūkis yra suderinti akvakultūros plėtrą su aplinkos tvarumu. Norint sumažinti anglies pėdsaką ir užtikrinti ilgalaikį aplinkosauginį gyvybingumą, būtina taikyti tvarius energijos vartojimo, žemės valdymo, pašarų gamybos ir atliekų tvarkymo sprendimus.

1. Šiltnamio efektą sukeliančios dujos ir anglies pėdsakas

Šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) išmetimas daro didelį poveikį Žemės atmosferai, nes sulaiko šilumą. Šios dujos yra anglies dioksidas (CO_2), metanas (CH_4), azoto oksidas (N_2O) ir fluorintos dujos. Nors apie CO_2 kalbama dažnai, CH_4 taip pat vaidina svarbų



vaidmenį visuotinio atšilimo procese. Dėl antropogeninės veiklos, pavyzdžiui, šlapžemių pertvarkymo, sąvartynų įrengimo, užtvankų statybos, biomasės deginimo, miškų kirtimo, kasybos, dujų ir anglies pramonės smarkiai padidėjo CH_4 emisija. Nepaisant trumpesnio CH_4 gyvavimo atmosferoje laiko, CH_4 yra daug veiksmingesnis šilumos sugėriklis nei CO_2 (Jungtinių Tautų aplinkosaugos programa, 2022). TKKK teigia, kad „žmogaus įtaka klimato sistemai yra akivaizdi, o pastaruoju metu antropogeninės kilmės šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos yra didžiausios per visą istoriją“. Nuo pramonės revoliucijos laikų dėl žmogaus veiklos gerokai padidėjo šių dujų koncentracija, todėl pakilo pasaulio temperatūra ir atsirado klimato kaitos padarinių. Dėl sparčios industrializacijos ir urbanizacijos daugelyje regionų dar labiau padidėjo išmetamų teršalų kiekis. Transporto sektorius, energijos gamyba ir pramoniniai procesai labai prisideda prie CO_2 išmetimo. Be to, žemės ūkio sektorius, įskaitant gyvulininkystę ir ryžių laukus, yra žymus CH_4 ir N_2O emisijos šaltinis. Šie išmetami teršalai turi didelių pasekmių, nes daro įtaką orų modeliams, jūros lygiui ir biologinei įvairovei. Pasaulinė akvakultūros pramonė, nors ir tvari alternatyva laukinių žuvų gaudymui, yra didelis ŠESD šaltinis. Energijai imli veikla, žemės naudojimo pokyčiai, pašarų gamyba ir atliekų tvarkymas prisideda prie akvakultūros anglies pėdsako (MacLeod et al., 2019).

1.1. ŠESD emisijos akvakultūros plėtros kontekste

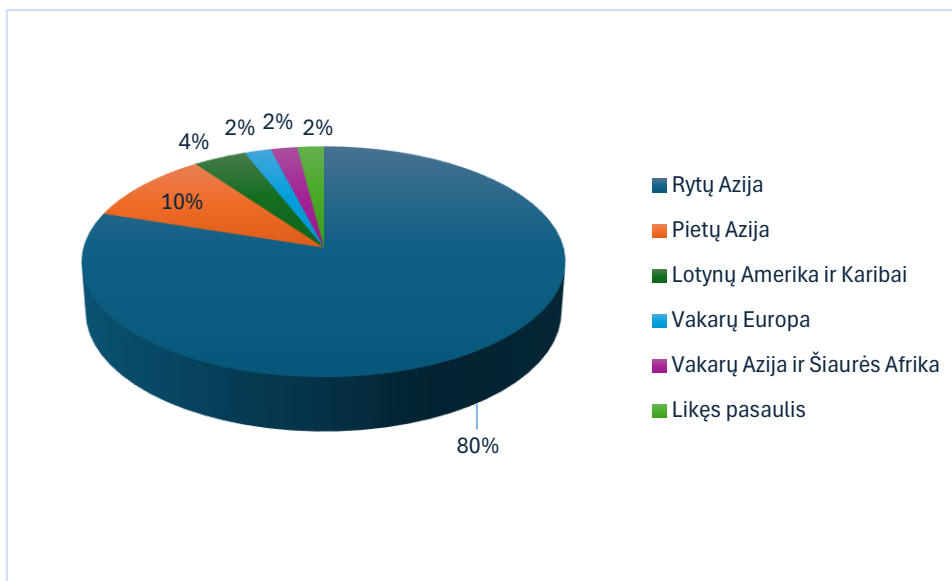
Pastaraisiais dešimtmečiais akvakultūra sparčiai plėtėsi ir tapo svarbia pasaulinės maisto gamybos grandies dalimi. Didėjant jūrų gėrybių paklausai, akvakultūra dažnai įvardijama kaip tvaresnė alternatyva tradicinei gyvulininkystei. Tačiau spartus šios pramonės augimas kartu kelia ir aplinkosaugos iššūkių – vienas svarbiausių iš jų yra šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisija. Didžiausias akvakultūroje išskiriamų ŠESD kiekis siejamas su anglies dioksido (CO_2), metano (CH_4) ir azoto suboksido (N_2O) išmetimu. Ši emisija kyla dėl energijos sąnaudų pašarų gamybai, žemės ūkio veiklų, trąšų naudojimo bei pačių auginamų organizmų medžiagų apykaitos procesų (MacLeod et al., 2019). Ypač daug metano išsiskiria anaerobinėmis sąlygomis akvakultūros tvenkiniuose, kur dėl deguonies stokos vyksta organinių medžiagų skilimas (Pu et al., 2022). Tokios sąlygos būdingos stovinčio ar lėtai tekančio vandens sistemoms su dideliu biomasės kiekiu.

Azoto suboksido (N_2O) emisija dažniausiai atsiranda dėl mikrobiologinių procesų, vykstančių azotu praturtintose aplinkose. Šios sąlygos dažnai susiformuoja dėl per didelio trąšų ar pašarų kiekio, kuris skatina azoto junginių kaupimąsi ir aktyvų denitrifikacijos procesą (Bano et al., 2024). Tiek CH_4 , tiek N_2O dujos sukelia stiprų šiltnamio efektą, todėl jų kontrolė ypač svarbi siekiant sumažinti akvakultūros sektoriaus indėlį į klimato kaitą.

MacLeod ir kt. (2019) atliktoje analizėje buvo įvertintas pasaulinės akvakultūros – kompleksiško sektoriaus, apimančio įvairias rūšis, auginamas skirtingose sistemose ir aplinkose – šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas. Tyrime pagrindinis dėmesys skiriamas svarbiausioms auginamų rūšių grupėms, išskyrus jūrų augalus. Didžiausia ŠESD emisija yra Rytų ir Pietų Azijos regionuose, jiems tenka net 90 proc. visos akvakultūros



produkcijos (2.1 pav.). Kinija užima pirmąją vietą pasaulyje pagal vandens produktų gamybą ir vartojimą bei atlieka svarbų vaidmenį užtikrinant pasaulinį aprūpinimą maistu (FAO, 2020). Indonezija, kurios žuvininkystės sektorius 2023 m. sparčiai augo, taip pat yra gana svarbi šalis – šiai veiklai tenka apie 3,2 proc. šalies bendrojo vidaus produkto (Sulistijowati et al., 2023).



2.1 pav. Bendro išmetamų ŠESD kiekio procentinė dalis pagal regionus (MacLeod et al., 2019, FAO Technical Paper No. 626)

Analizuojant rūšių grupes paaiškėjo, kad didžiausia ŠESD emisija tenka karpinių žuvų (33 proc.) ir krevečių (18 proc.) auginimui (2.2 pav.). Ypač didelę emisiją sukelia intensyvaus krevečių auginimo tvenkiniai, kuriuose dėl anaerobinių sąlygų (ypač dumblėtame dugne) susidaro reikšmingas metano (CH_4) kiekis. Šis reiškinys dažniausiai pasireiškia pakrančių regionuose, kurių ekosistemos yra itin jautrios.

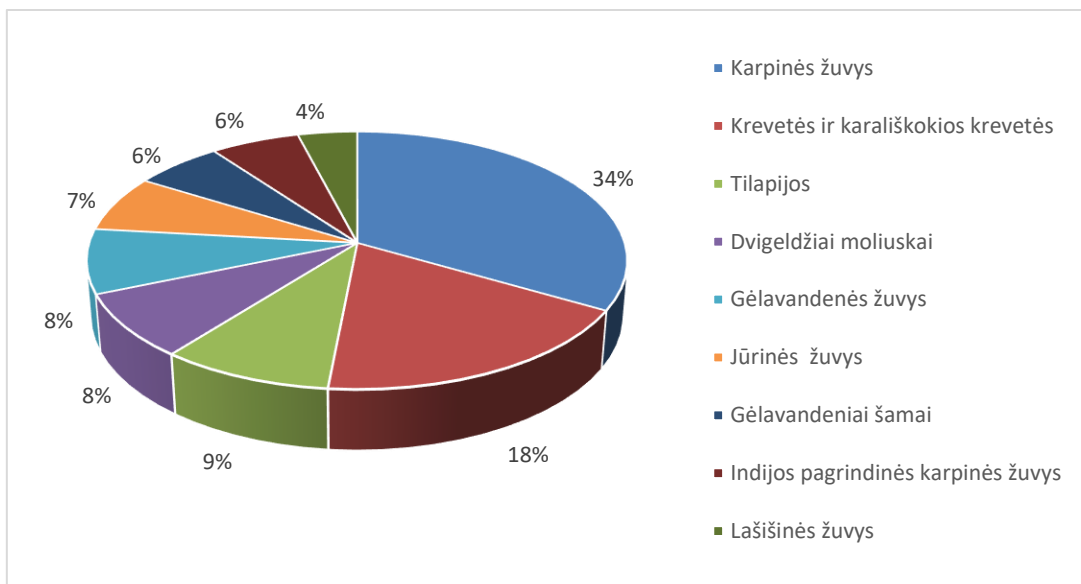
Tyrimas taip pat parodė, kad didžiausias ŠESD šaltinis yra pašarų gamyba – jai tenka net 55 proc. visos emisijos, susijusios su žuvų auginimu (2.3 pav.). Kiti svarbūs šaltiniai yra energijos vartojimas ūkiuose ir N_2O emisijos iš vandens (ypač tvenkiniuose).



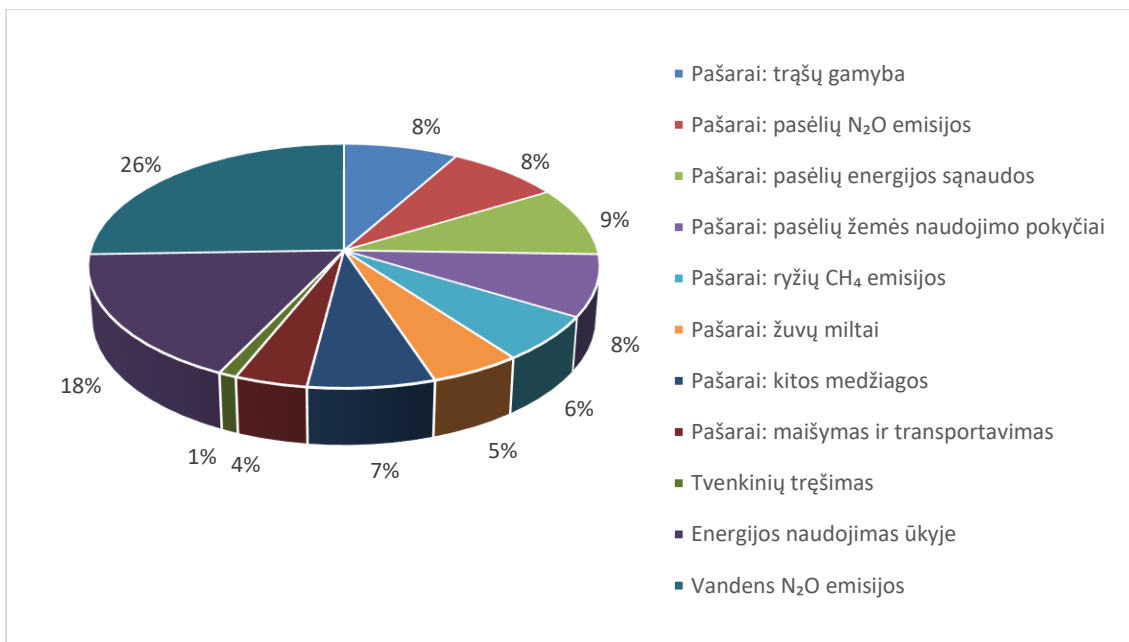
Funded by
the European Union



Skaitmeninė mėlynoji karjera įveikus anglies krizę – akvakultūros mokymo programos naujovės [DiBluCa]
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247



2.2 pav. Viso ŠESD kiekio procentinė dalis pagal auginamų rūšių grupes (MacLeod et al., 2019, FAO Technical Paper No. 626)



2.3 pav. Išmetamųjų ŠESD kiekio procentinė dalis pagal šaltinių kategorijas (MacLeod et al., 2019, FAO Technical Paper No. 626)

1.2. Pagrindiniai šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltiniai

N₂O daugiausia susidaro mikrobiologiškai konvertuojant azotą dirvožemyje auginant augalus, taip pat mikrobiologiškai konvertuojant azoto junginius iš pašarų ir trąšų akvakultūros tvenkiniuose (MacLeod et al., 2019). TKKK (2007) informavo, kad nuo pramonės laikų padidėjo N₂O ir CH₄ koncentracija, o tai kelia susirūpinimą, nes šios dujos, nors jų



koncentracija yra mažesnė nei anglies dioksido (CO_2), per 100 metų 298 (N_2O) ir 25 (CH_4) kartus viršija CO_2 visuotinio atšilimo potencialą. N_2O susidarymo greitį lemia daugybė fizikinių ir cheminių veiksnių, tokių kaip temperatūra, druskingumas ir pH, kurie gali kisti pagal sezoną. Pastebėta, kad daugiau N_2O išsiskiria iš akvakultūros didelio tankio žuvų auginimo sistemose, ypač Azijoje, kur akvakultūros plėtra didžiausia (FAO, 2020). Tyrimai rodo, kad net nedidelio masto akvakultūra gali prisidėti prie N_2O emisijos, prilygstančios žemės ūkio veiklos emisijai (Rahman et al., 2022).

CO_2 išsiskiria dėl energijos suvartojimo prieš eksploatavimą (daugiausia susijusios su pašarų ir trąšų gamyba), energijos suvartojimo eksploatavimo metu (pavyzdžiui, vandens pumpavimas, elektros energijos suvartojimas, kito kuro naudojimas) ir paskirstymo bei perdirbimo po eksploatavimo. CO_2 taip pat išmetama dėl antžeminių ir požeminių anglies sandėlių pokyčių, atsirandančių dėl žemės naudojimo ir žemės naudojimo paskirties keitimo (pievų keitimo į dirbamąją žemę). CH_4 , kuris daugiausia susidaro dėl anaerobinio organinių medžiagų skaidymo užliejamuose ryžių plotuose, taip pat gali susidaryti tvarkant žuvininkystės ūkių atliekas (MacLeod, 2019). Žuvų ūkiuose susidaro organinių atliekų, įskaitant nesuvalgytą pašarą, žuvų ekskrementus ir kitus šalutinius produktus. Šioms medžiagoms skylančioms anaerobinėje aplinkoje, pavyzdžiui, nuosėdose arba prastai tvarkomose atliekų lagūnose, išsiskiria metanas (CH_4) (Pu et al., 2022).

2. Energijos sąnaudos ir tvarumas

Akvakultūros veiklos anglies dioksido pėdsakas glaudžiai susijęs su naudojamais energijos šaltiniais. Daugelyje pasaulio regionų akvakultūros operacijos priklauso nuo elektros energijos, kuri dažnai gaminama naudojant iškastinį kurą. Dėl to į atmosferą išmetamas reikšmingas kiekis anglies dioksido (CO_2), prisidedantis prie šiltnamio efekto (Li et al., 2024). Elektros energijos gamybos CO_2 intensyvumas labai priklauso nuo dominuojančių energijos rūšių konkrečiame regione: tose vietovėse, kuriose pagrindinis šaltinis yra anglis, nafta ar gamtinės dujos, emisijos lygis yra gerokai aukštesnis. Ypač didelį poveikį aplinkai daro didelio masto, energijai imlios akvakultūros operacijos, kuriose naudojama daug elektros, kad veiktų filtravimo, aeravimo, temperatūros palaikymo ir automatizuotos šėrimo sistemos. Dėl šių veiksnių būtina diegti energiją taupančias technologijas ir plėtoti atsinaujinančiais ištekliais grįstus sprendimus, kad būtų galima mažinti anglies dioksido emisiją ir pereiti prie tvaresnės akvakultūros praktikos.

2.1. Energijos šaltiniai ir jų poveikis aplinkai

Nors akvakultūra yra svarbi globalios maisto gamybos dalis, jos spartus augimas kelia vis didesnę aplinkosauginį susirūpinimą (Naylor et al., 2000). Vieni iš pagrindinių su akvakultūra susijusių iššūkių – pašarų gamyba, energijos vartojimas ir dideli kiekiai maistinių medžiagų turinčių nuotekų, atsirandančių dėl gyvūnų medžiagų apykaitos (Thomas et al., 2021). Aplinkosauginiam tvarumui vertinti plačiai taikoma gyvavimo ciklo vertinimo (angl.



Life Cycle Assessment, GCV) metodika, apibrėžta ISO 14040 ir 14044 standartuose (ISO, 2006a; 2006b). Ši metodika leidžia kiekybiškai įvertinti produktų, procesų ar paslaugų daromą poveikį aplinkai per visą jų gyvavimo ciklą – nuo žaliavų išgavimo iki atliekų susidarymo – ir padeda nustatyti galimus neigiamus padarinius ekosistemoms, žmonių sveikatai ir gamtos ištekliams (Cucurachi et al., 2019). Akvakultūros energijos poreikis susijęs su technologiniais sprendimais, reikalingais norint palaikyti optimalias auginamų rūšių gyvenimo sąlygas. Tam būtina užtikrinti efektyvią vandens cirkuliaciją, aeraciją, temperatūros kontrolę, apšvietimą bei automatizuotą šėrimą. Šios technologijos ypač svarbios recirkuliacinėse akvakultūros sistemose (RAS), kurios, nors ir tvaresnės vandens išteklių atžvilgiu, dažnai pasižymi didesniu energijos suvartojimu (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Energijos naudojimas įvairiuose akvakultūros operacijų etapuose

Akvakultūros veiklos	Energijos poreikiai
Inkubatoriai ir jauniklių auginimo patalpos	Temperatūros palaikymas, apšvietimas ir vandens cirkuliacija
Tvenkinių ir rezervuarų sistemos	Aeracija, siurbimas ir filtravimas
Recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS)	Vandens valymas ir temperatūros reguliavimas
Varžos ir atviros jūros sistemos	Laivų transportas, šėrimo sistemos ir žuvų surinkimas
Pašarų gamyba ir perdirbimas	Daug energijos naudojantys ingredientų šaltiniai, gamyba ir transportavimas

Tačiau šie energijos poreikiai, ypač kai energija gaunama iš iškastinio kuro, reikšmingai prisideda prie anglies dioksido emisijos, kuri skatina visuotinį atšilimą. Kadangi akvakultūros pramonė toliau plečiasi, norint užtikrinti jos ilgalaikį tvarumą, itin svarbu suprasti su energija susijusį poveikį aplinkai ir siekti jį mažinti. Siekiant tvarumo akvakultūroje, būtina derinti energijos suvartojimą su aplinkosaugos tikslais. Vienas iš perspektyviausių sprendimų – atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas į akvakultūros veiklą, kuris gali reikšmingai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją (2.2 lentelė).

2.2 lentelė. Pirminės energijos šaltiniai akvakultūroje

Energijos šaltiniai	Panaudojimo sritys
Iškastinis kuras (dyzelinas, anglis, gamtinės dujos)	Generatoriai, transportas, šėrimo įranga, gamybos ir perdirbimo įrenginiai
Elektra (dažniausiai iš neatsinaujinančių šaltinių)	Vandens siurbiai, aeracijos sistemos, temperatūros reguliavimo ir šaldymo įranga

Parinkus ūkininkavimo sistemą, taip pat auginant mažiau energijos ir pašarų naudojančias rūšis galima reikšmingai sumažinti poveikį aplinkai ir energijos sąnaudas. Gamybos energijos sąnaudos susijusios ne tik su ekosistemų išteklių efektyvumo ar neatsinaujinančių šaltinių išeikvojimo klausimais, bet ir su galimomis ilgalaikėmis pasekmėmis visuomenei dėl aplinkos pokyčių, kylančių dėl taršos ir klimato kaitos (FAO, 2022; Parker et al., 2018).



2.2. Akvakultūros energijos sąnaudos: pagrindiniai aspektai

Akvakultūra yra itin daug energijos naudojanti pramonės šaka, kuriai reikalinga didelė energijos dalis, siekiant palaikyti optimalias sąlygas auginamoms rūšims. Įvairūs procesai – nuo vandens cirkuliacijos ir aeracijos iki temperatūros kontrolės bei šėrimo – būtini vandens organizmams augti ir sveikatai, tačiau skirtingai prisideda prie bendro energijos vartojimo, priklausomai nuo veiklos masto ir auginamų rūšių.

1. Vandens cirkuliacija ir aeracija: deguonies koncentracijos palaikymas akvakultūros sistemose yra esminis veiksnys, lemiantis žuvų ir vėžiagyvių gyvybingumą. Aeracijos sistemos, ypač intensyviose sistemose, kuriose didelis gyvūnų tankis, naudoja daug energijos, kad vanduo būtų prisotintas deguonies. Be to, vandens cirkuliacijos sistemos užtikrina tolygų deguonies, maistinių medžiagų ir atliekų pasiskirstymą, o tai dar labiau didina energijos poreikį (Tacon & Metian, 2009).

2. Temperatūros kontrolė: temperatūra stipriai veikia augimo tempą ir medžiagų apykaitą. Šaltuose regionuose arba auginant tropines rūšis vidutinio klimato zonose, būtina aktyviai reguliuoti vandens temperatūrą. Tam naudojami šildytuvai, aušintuvai ar šilumokaičiai – visi šie įrenginiai naudoja daug energijos. Nors šios sistemos padeda užtikrinti tinkamas augimo ir dauginimosi sąlygas, jos reikšmingai prisideda prie bendro energijos suvartojimo (Boyd & McNevin, 2015).

3. Šėrimo sistemos: norint padidinti efektyvumą ir sumažinti pašarų švaistymą, akvakultūros ūkiuose vis dažniau diegiamos automatizuotos šėrimo sistemos. Jos leidžia tiksliai ir tolygiai paskirstyti pašarus, pagerina konversijos rodiklius ir bendrą produktyvumą. Tačiau šioms sistemoms taip pat reikia papildomai elektros energijos (Matulić et al., 2020).

3. Žemės naudojimo ir buveinių pokyčiai

Atsižvelgiant į nuolat augančią pasaulinę žuvų ir jūrų gėrybių paklausą, vienas didžiausių iššūkių yra suderinti akvakultūros sektoriaus plėtrą su aplinkosauginio tvarumo principais. Akvakultūros dažnai sparčiai auga ekologiškai jautriose teritorijose, todėl vyksta reikšmingi žemės naudojimo pokyčiai ir buveinių konversija. Ypač didelį poveikį patiria vertingos ekosistemos, tokios kaip mangrovės, pelkės ir pakrančių zonos. Šių buveinių praradimas ne tik mažina biologinę įvairovę, bet ir lemia padidėjusį anglies dioksido išmetimą bei spartina ekosistemų degradaciją. Tokie pokyčiai kelia rimtų abejonių dėl ilgalaikio akvakultūros sektoriaus tvarumo ir gebėjimo prisidėti prie pasaulinio aprūpinimo maistu (Barbier et al., 2011).

Mangrovių nykimas ir anglies dioksido išmetimas

Viena iš reikšmingiausių neigiamų akvakultūros plėtros pasekmių yra buveinių – ypač pakrančių ekosistemų – nykimas arba blogėjimas. Tai apima ne tik mangrovių miškus, bet ir kitas šlapynes, tokias kaip jūros žolių pievos, druskingosios pelkės, pakrančių lagūnos bei estuarijos (Wu, 1995; Dev, 1998; Naylor et al., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Ruiz et al., 2001;



Pérez et al., 2008). Mangrovės yra itin svarbios ekosistemos. Jos aprūpina organinėmis medžiagomis, sudaro daugelio ekonomiškai reikšmingų vandens gyvūnų rūšių veisimosi buveines, taip pat suteikia prieglobstį paukščiams bei kitiems sausumos gyvūnams (Tidwell & Allan, 2001; Páez-Osuna, 2005). Be to, šie miškai atlieka svarbią ekologinę funkciją: jie sulaiko nuosėdas, teršalus, azoto junginius ir anglį, mažina pakrančių eroziją ir padeda apsisaugoti nuo ekstremalių oro reiškinių (Alongi, 2002; Walters et al., 2008).

Tačiau mangrovių nykimas siekia 1–2 proc. per metus, o pagrindinė šio proceso priežastis yra intensyvi krevečių ir žuvų akvakultūra, ypač tokiose šalyse kaip Tailandas, Indonezija, Ekvadoras ir Madagaskaras (Naylor et al., 2000; Harper et al., 2007). Dėl šios veiklos jau sunaikinta milijonai hektarų mangrovių miškų, o Viduržemio jūros regione narvinės akvakultūros poveikis taip pat pasireiškė *Posidonia oceanica* jūros žolių pievų degradacija dėl per didelės organinės apkrovos. Mangrovių pavertimas krevečių fermomis lemia didžiulį biologinės įvairovės praradimą – nyksta žuvų, vėžiagyvių, paukščių ir kitų gyvūnų mitybos, veisimosi ir prieglobsčio vietos (Dev, 1998; Páez-Osuna, 2001; Ruiz et al., 2001; Pérez et al., 2008). Taip pat prarandama natūrali apsauga nuo potvynių, audrų ir uraganų, o pakrančių bendruomenės tampa dar labiau pažeidžiamos klimato kaitos poveikio.

Ypač didelį susirūpinimą kelia anglies dioksido emisijos, susijusios su mangrovių naikinimu. Alongi (2015) pažymi, kad mangrovių konversija į akvakultūros teritorijas ne tik sustabdo jų gebėjimą kaupti anglį, bet ir išlaisvina jau sukauptą anglį iš dirvožemio į atmosferą. Kadangi mangrovės yra vienos iš daugiausia anglies kaupiančių ekosistemų pasaulyje – viename hektare jos gali sukaupti iki penkis kartus daugiau anglies nei atogrąžų miškai – jų naikinimas laikomas itin žalingu klimato požiūriu (Barbier et al., 2011). Dėl pakrančių pelkių nykimo ne tik prarandamas anglies kaupimo potencialas, bet ir silpnėja pakrančių apsauga, didėja erozija, o vietos bendruomenės susiduria su didesne rizika dėl klimato kaitos poveikio.

Šlapynių ir žemės ūkio paskirties žemės pokyčiai

Vidaus vandenų akvakultūros plėtra ženkliai paveikė žemės naudojimo struktūrą, ypač transformuojant šlapžemių ir žemės ūkio paskirties žemes į akvakultūros veiklai skirtas teritorijas. Šis pokytis dažnai grindžiamas ekonominiu akvakultūros patrauklumu, nes ji gali generuoti didesnę finansinę grąžą nei tradicinė žemdirbystė (Ahmed & Thompson, 2019). Tačiau tokia plėtra sukelia rimtų aplinkosaugos pasekmių. Viena svarbiausių problemų – natūralių ekosistemų, ypač šlapynių, naikinimas. Šlapynės atlieka kritiškai svarbias ekologines funkcijas: filtruoja vandenį, reguliuoja potvynius, palaiko biologinę įvairovę ir tarnauja kaip anglies kaupimo sistemos. Jas nusiausinant ir konvertuojant į žuvininkystės tvenkinius, prarandamas kraštovaizdžio atsparumas ir gebėjimas susidoroti su aplinkos pokyčiais.

Rahman ir kt. (2022) pabrėžia, kad žemės ūkio paskirties žemės pavertimas akvakultūros plotais gali sukelti didelę, o dažnai ir negrįžtamą, ekologinę žalą. Todėl būtina taikyti tvarią žemės naudojimo praktiką, kad būtų išsaugotos esamos ekosistemos. Be to, intensyvi akvakultūra lemia organinių atliekų, cheminių medžiagų ir perteklinių maistinių



medžiagų kaupimąsi dirvožemyje ir vandenyje. Šios medžiagos skatina eutrofikacijos procesus – per didelį maistingųjų medžiagų kiekį vandenyje, kuris sukelia dumblių žydėjimą, mažina deguonies koncentraciją ir trikdo natūralių vandens ekosistemų funkcionavimą (Boyd et al., 2020).

Buveinių fragmentacija ir biologinės įvairovės nykimas

Akvakultūros plėtra prisidėjo prie buveinių fragmentacijos, dėl kurios sutrinka ekologiniai ryšiai ir rūšims tampa sunku migruoti, daugintis ir rasti maisto išteklių. Dėl tokio susiskaidymo gali mažėti populiacijos ir nykti biologinė įvairovė. Svetimų rūšių introdukcija veisimo tikslais dar labiau sustiprina šį poveikį, nes jos konkuruoja su vietinėmis rūšimis arba jas išnaikina, dar labiau destabilizuodamos ekosistemas (Chavez et al., 2020).

Naujausi tyrimai rodo didelį buveinių fragmentacijos poveikį biologinei įvairovei (Marrone et al., 2023). Žemės ūkio paskirties žemės pavertimas akvakultūros plotais lėmė nuolatinius ekologinius pokyčius, todėl išryškėja tvarios praktikos svarba tokiems perėjimams (Rahman et al., 2022). Dėl buveinių naikinimo mažėja populiacijų dydis ir fragmentuojasi rūšių arealai, todėl sutrinka individų judėjimas tarp buveinių plotų ir mažėja jų išlikimo galimybės (Haddad et al., 2015).

4. Pašarų gamyba ir išteklių naudojimas

Akvakultūrai skirtų pašarų gamyba yra svarbus šio sektoriaus aspektas, tačiau ji daro didelį poveikį aplinkai. Pašarų ingredientams, pavyzdžiui, žuvų miltams ir augalinės kilmės ingredientams, gauti reikia daug gamtinių išteklių, pavyzdžiui, žemės, vandens ir energijos. Tai prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo ir aplinkos būklės blogėjimo. Apskaičiuota, kad iki 90 proc. šiltnamio efektą sukeliančių dujų, išmetamų žuvų ūkiuose, tenka akvakultūros pašarų gamybai (FAO, 2022). Didėjant akvakultūros produktų paklausai, siekiant sumažinti poveikį aplinkai ir užtikrinti ilgalaikį šios pramonės šakos tvarumą, labai svarbu taikyti tvarią pašarų gamybos praktiką.

4.1. Akvakultūros pašarai ir alternatyvūs baltymų šaltiniai

Norint patenkinti auginamų žuvų ir jūrų gėrybių mitybos poreikius, akvakultūroje naudojami įvairios sudėties kombinuotieji pašarai. Tradiciškai svarbiausia sudedamoji dalis yra žuvų miltai, gaminami daugiausia iš mažų pelaginių žuvų, tokių kaip ančiuviai ir sardinės. Vis dėlto kylant vis didesniui susirūpinimui dėl peržvejojimo, jūrų išteklių išsekimo ir poveikio biologinei įvairovei ieškoma tvaresnių alternatyvų (Tacon & Metian, 2009). Atsižvelgdama į šiuos iššūkius, akvakultūros pramonė vis dažniau eksperimentuoja su alternatyviais pašarų ingredientais. Vieni dažniausiai nagrinėjamų variantų – augalinės kilmės baltymai, tokie kaip sojos, kviečiai ir kukurūzai. Šie komponentai laikomi perspektyviais žuvų miltų pakaitalais, galinčiais sumažinti priklausomybę nuo jūrų išteklių (Duarte et al., 2020; O'Flynn et al., 2021).

Be to, pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio sulaukia vabzdžių baltymai – ypač juodųjų kareivių musų (*Hermetia illucens*) ir miltinių sliekų (*Tenebrio molitor*). Vabzdžių



baltymai gali būti gaunami naudojant organines atliekas kaip substratą, todėl jie vertinami kaip tvari alternatyva, kuriai reikia mažesnių žemės ir vandens resursų ir kuri padeda mažinti ekologinį pėdsaką (Freda et al., 2022).

Apskritai pastangos pakeisti tradicinius pašarų ingredientus alternatyviais sprendimais atspindi didėjančią supratimą apie būtinybę derinti produktyvią akvakultūrą su tvarumo principais. Tinkamai parinkti pašarų šaltiniai gali padėti sumažinti spaudimą jūrų ekosistemoms ir kartu užtikrinti didelę auginamų rūšių maistinę vertę.

4.2. Akvakultūros pašarų gamybos poveikis aplinkai

Augalinių pašarų poveikis aplinkai

Žuvų miltų pakeitimas augalinės kilmės ingredientais, tokiais kaip sojos ar kukurūzai, padeda sumažinti spaudimą jūrų ekosistemoms. Tačiau šis perėjimas sukelia naujų aplinkosaugos iššūkių (Tacon & Metian, 2009). Didėjanti augalinių komponentų paklausa skatina keisti žemės paskirtį, ypač tropiniuose regionuose, kur siekiama plėsti žemės ūkio plotus, atitinkančius pašarų gamybos poreikius (Fargione et al., 2023). Tokie pokyčiai daro didelę įtaką aplinkai – plečiant dirbamus plotus dažnai naikinami miškai, nyksta natūralios buveinės, mažėja biologinė įvairovė. Ypač pažeidžiami tropiniai miškai, kurių dideli plotai iškertami siekiant auginti pašarams skirtas kultūras, tokias kaip sojos ir kukurūzai. Dėl to didėja šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija, silpnėja ekosistemų atsparumas, trikdomas natūralus anglies ciklas ir mažėja anglies kaupimo galimybės.

Poveikis klimato kaitai ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijai

Be žemės paskirties keitimo, augalinės kilmės pašarų gamyba tiesiogiai prisideda prie klimato kaitos per šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisiją. Miškų kirtimas, siekiant paversti teritorijas žemės ūkio naudmenomis, sukelia didelius anglies dioksido (CO₂) nuostolius – tiek dėl anglies atsargų praradimo medienoje ir dirvožemyje, tiek dėl energijos, naudojamos kirtimui ir transportavimui (Soussana et al., 2021). Be to, auginant pašarams skirtus augalus intensyviai naudojamos sintetinės trąšos ir pesticidai, dėl kurių į atmosferą išsiskiria azoto suboksidas (N₂O) – itin stiprios šiltnamio efektą sukeliančios dujos (Pardoe et al., 2022). Šios emisijos turi poveikį ne tik globaliu mastu, bet ir veikia vietos klimatą, didina akvakultūros sistemų pažeidžiamumą ir ilgainiui mažina jų tvarumą.

Žemės degradacija, vandens suvartojimas ir biologinės įvairovės nykimas

Sojų pupelės, kurios yra pagrindinė daugelio akvakultūroje naudojamų pašarų sudedamoji dalis, kelia vis daugiau aplinkosaugos iššūkių. Tarp jų – dirvožemio degradacija, per didelis vandens vartojimas ir žemės ūkio biologinės įvairovės mažėjimas (Magrin et al., 2020). Sparčiai plintant intensyvioms sojų monokultūroms, didėja dirvožemio erozija, išplaunamos maistinės medžiagos, o pasėliai tampa jautresni ligoms ir kenkėjams. Tai verčia ūkininkus dažniau naudoti pesticidus ir trąšas, o šios medžiagos patenka į vandens telkinius, tad prisideda prie vandens taršos ir eutrofikacijos (Pardoe et al., 2022). Be to, žemės ūkio plėtra



dažnai vyksta vertingų ekosistemų – pelkių, miškų, natūralių pievų – sąskaita. Šių teritorijų naikinimas ne tik sumažina kraštovaizdžio ekologinę vertę, bet ir sutrikdo vietinius anglies apytakos ciklus. Dėl to mažėja gebėjimas sugerti šiltnamio efektą sukeliančias dujas, silpnėja atsparumas klimato kaitai ir didėja rizika patirti neigiamus ekstremalių orų reiškinių padarinius, tokius kaip potvyniai ar sausros (Fargione et al., 2023).

Anglies dioksido pėdsakas ir energijos sąnaudos

Be žemės naudojimo pokyčių, reikšmingą poveikį klimatui daro ir dideli energijos kiekiai, reikalingi augalinės kilmės pašarų gamybai. Trąšų gamyba, transportavimas ir žemės paruošimo darbai dažnai priklauso nuo iškastinio kuro, todėl reikšmingai prisideda prie anglies dioksido (CO₂) emisijų (Soussana et al., 2021). Pašarų gamybos procese daug energijos sunaudojama ir žaliavoms perdirbti – džiovinti, malti, maišyti, granuliuoti. Jei šie procesai vykdomi naudojant neatsinaujinančius energijos šaltinius, jų anglies pėdsakas dar labiau išauga. Dėl šių veiksnių kyla abejonių, ar augalinės kilmės pašarų alternatyvos iš tiesų yra ilgalaikis tvarus sprendimas, ypač vertinant jų bendrą poveikį klimato kaitai.

4.3. Pašarų parinkimas ir mityba akvakultūroje

Veiksniai, turintys įtakos pašarų pasirinkimui

Tinkamas žuvų ir vėžiagyvių pašaro pasirinkimas yra vienas svarbiausių sėkmingo akvakultūros ūkio veiksnių. Pašarai parenkami atsižvelgiant į kelis kriterijus: auginamos rūšies mitybos pobūdį (žolėdžiai, visaėdžiai ar mėšėdžiai), šios rūšies ekonominę vertę bei naudojamą auginimo sistemą. Pavyzdžiui, intensyvioms sistemoms (tokioms kaip bėgimo takai, tankūs tvenkiniai ar narvai) dažniausiai reikalingi specialiai suformuluoti, subalansuoti pašarai, užtikrinantys greitą augimą ir gerą pašarų konversijos koeficientą (FCR). Tuo tarpu ekstensyviose sistemose (pavyzdžiui, natūraliuose tvenkiniuose) augintiniai gali pasikliauti ir natūraliais maisto ištekliais, todėl pašarų poreikis yra mažesnis (Tacon et al., 2013).

Ekonominiai ir aplinkosaugos aspektai renkant pašarus

Augalininkystės ir žuvininkystės ūkiai dažnai susiduria su pašarų kainų, prieinamumo ir kokybės klausimais. Kai komerciniai pašarai nėra lengvai prieinami ar tinkami konkrečioms rūšims, ūkininkai kartais pasirenka vietoje gaminamus pašarus. Šie pašarai gaminami iš lokaliai prieinamų žaliavų, tokių kaip žemos kokybės žuvis, žemės ūkio likučiai ar kiti šalutiniai produktai. Toks pasirinkimas dažnai priklauso nuo ūkininko finansinių galimybių, įskaitant pašarų kainą, sandėliavimo sąlygas bei darbo sąnaudas (Tacon et al., 2013). Tačiau netinkamai taikomos šėrimo praktikos – ypač perteklinis šėrimas – ne tik didina sąnaudas, bet ir lemia aplinkos taršą dėl nesuvirškintų maistinių medžiagų patekimo į aplinką. Todėl taikant veiksmingą pašarų valdymą reikėtų derinti ekonominį efektyvumą su aplinkos apsaugos principais, siekiant užtikrinti ilgalaikį ūkininkavimo tvarumą (White, 2013).



Pašarų kokybė ir efektyvumas

Svarbus akvakultūros uždavinys – patenkinti žuvų mitybos poreikius, taikant tinkamą pašarų racioną, kuris optimizuotų augimą ir FCR. Žuvų rūšių energijos ir maistinių medžiagų poreikis gali skirtis kasdien, sezoniškai ir priklausomai nuo individo. Nesubalansuotas racionas, nepakankamas šėrimas arba perteklinis šėrimas gali lemti mažą gamybos efektyvumą ir prisidėti prie aplinkos būklės blogėjimo, ypač auginant žuvis narvuose (Bureau et al., 2006; Thorpe ir Cho, 1995). Norint sumažinti nuostolius ir pasiekti ekonominį bei aplinkosauginį tvarumą, būtina taikyti tinkamas pašarų valdymo strategijas (Talbot, Corneillie & Korsøen, 1999; Cho & Bureau, 1998).

Peržvejojimas

Laukinių išteklių ir biologinės įvairovės naudojimas akvakultūros pašarams gaminti ir sėkloms bei jaunikliams tiekti gali padaryti didelės žalos vandens ekosistemoms (Dev, 1998; Choo, 2001; Páez-Osuna, 2001). Laukinių žuvų rūšys, turinčios mažą komercinę vertę, pavyzdžiui, japoniniai ančiuviai ir skumbrės, dažnai naudojamos mėsėdžių žuvų pašarams arba kaip papildomas pašaras tokioms rūšims kaip krevetės, tilapijos ir pieninės žuvis. Tokia praktika daro papildomą spaudimą jau ir taip pereikvotiems laukinių žuvų ištekliams. Laukinių žuvų, pavyzdžiui, ungurių, gruperių, geltonuodegių ir tunų, išvežimas dar labiau prisideda prie natūralių populiacijų nykimo.

Laukinių krevečių ir vėžiagyvių dauginamosios medžiagos rinkimas yra ypač kenksmingas, nes kelia grėsmę ne tik tikslinėms rūšims, bet ir žūsta netiksliniai organizmai, pavyzdžiui, kitos krevečių rūšys, makrozooplanktonas ir žuvų bei vėžiagyvių jaunikliai. Šis mitybos tinklo sutrikimas daro poveikį įvairiems organizmams, įskaitant vandens paukščius, roplius ir žinduolius, todėl padidėja mirtingumas ir sumažėja veisimosi sėkmė (Choo, 2001). Be to, laukinių rūšių išvežimas gali lemti vietinių populiacijų genetinę degradaciją ir natūralių buveinių sunaikinimą, todėl vandens ekosistema dar labiau sutrinka (Dev, 1998). Ši problema ypač aktuali intensyviai žvejojamos ir mažai reprodukcinių gebėjimų turinčioms rūšims. Kol nelaisvėje auginamų reproduktorių produkcija yra brangi, tikėtina, kad laukinių nerštaviečių pirkimas tęsis ir dar labiau kenks aplinkai (Nash, 2005).

5. Tarša ir likutinės medžiagos

Akvakultūros ūkiuose gali susidaryti didelis kiekis atliekų ir nuotekų, kurių sudėtyje yra įvairių teršalų: nesuėsto pašaro likučių, žuvų išmatų, ištirpusių medžiagų apykaitos produktų (pavyzdžiui, išsiskiriančių per žiaunas ir inkstus) bei cheminių medžiagų, tokių kaip vaistai, trąšos ar sunkieji metalai. Šios medžiagos gali sukelti nepageidaujamą poveikį aplinkai (Wu, 1995; Dev, 1998; Páez-Osuna, 2001; Read & Fernandes, 2003). Ypač svarbus yra kietųjų dalelių ir ištirpusių organinių bei neorganinių medžiagų poveikis, nes šie junginiai tiesiogiai patenka į vandens telkinius ir veikia tiek vandens stulpą, tiek dugno nuosėdas (Dalsgaard &



Krause-Jensen, 2006; Holmer et al., 2007). Atliekų poveikio mastas priklauso nuo daugybės veiksnių: ūkio vietos, auginamų rūšių, gyvulių tankumo, pašarų sudėties ir virškinamumo, šėrimo režimo bei bendros sveikatingumo būklės (Wu, 1995).

2.3 lentelė. Akvakultūros plėtros veiksniai, poveikis ir atsakomieji veiksmai (Serpa & Duarte, 2008)

Veiksny	Veikla	Būsena	Poveikis	Atsakas
Žuvų auginimas	Padidėjęs maistinių medžiagų srautas	Didesnė maistinių medžiagų ir organinių medžiagų koncentracija	Fitoplanktono biomasės didėjimas / eutrofikacija	Jūrų dumblių auginimas maistinių medžiagų pertekliui pašalinti
	Padidėjęs organinių medžiagų srautas	Sumažėjęs deguonies kiekis / padidėjusi deguonies paklausa	Deguonies trūkumas. Organinių medžiagų kaupimasis nuosėdose	Didesnis dugninės gyvūnijos mirtingumas / sumažėjusi įvairovė
	Padidėjusios hidrodinaminės traukos jėgos	Sumažėjęs vandens pratekėjimas / padidėjęs vandens užsilaikymo laikas	Intensyvesnis nuosėdų kaupimasis	Ūkių perkėlimas į teritorijas su stipresnėmis srovėmis
	Ksenobiotikų (kenksmingų cheminių medžiagų) išsiskyrimas	Biokoncentracija	Padidėjęs netikslinių rūšių mirtingumas	Mažiau intensyvi akvakultūra siekiant sumažinti ligų plitimą

Meteorologinės (pavyzdžiui, vėjo pobūdis), hidrografinės (pavyzdžiui, batimetrija, srovės, potvynių ir atoslūgių režimas, bangavimas, nuosėdų susidarymo greitis) ir geomorfologinės akvakultūros vietovių charakteristikos (Nordvarg & Hakanson 2002; Kalantzi & Karakassis 2006) daro didelę įtaką bet kokio tipo atliekų, patenkančių į vandens stovymą, likimui.

Intensyvios gamybos sistemų, kuriose naudojama daug pašarų, nuotekos paprastai turi didesnę neigiamą poveikį nei pusiau intensyvių ar ekstensyvių sistemų, kuriose pašarų dedama nedaug arba visai nededama, nuotekos (Kautsky et al., 2000; Pérez-Osuna, 2001).

Akvakultūros atliekos, įskaitant nesuvalgytus pašarus, žuvų ekskrementus ir cheminių medžiagų likučius, daro didelį poveikį aplinkai. Azoto ir fosforo perteklius prisideda prie vandens taršos ir eutrofikacijos, dėl to mažėja deguonies kiekis ir klesti kenksmingi dumbliai. Akvakultūroje naudojamos cheminės medžiagos gali sukelti atsparumą antibiotikams ir sutrikdyti ekosistemą, o buveinių nykimas, pavyzdžiui, mangrovių kirtimas, kelia grėsmę biologinei įvairovei. Sprendžiant šiuos iššūkius būtina taikyti tvarią praktiką, pavyzdžiui,



gerinti atliekų tvarkymą ir taikyti ekologiškus ūkininkavimo metodus, kad būtų sumažintas neigiamas akvakultūros poveikis aplinkai.

5.1. Maistinių medžiagų išsiskyrimas ir eutrofikacija

Akvakultūros atliekos, ypač nesuvalgytas pašaras ir žuvų ekskrementai, į aplinkinius vandenį patenka su dideliais azoto ir fosforo kiekiais. Šių maistinių medžiagų perteklius gali sukelti eutrofikaciją – pernelyg spartų dumblių žydėjimą, kuris mažina deguonies koncentraciją ir neigiamai veikia vandens organizmus.

Be organinių teršalų, į nuotekas patenka įvairių neorganinių junginių (pavyzdžiui, amoniakas, nitritai, nitratai ir fosfatai), susidariusių dėl medžiagų apykaitos produktų išsiskyrimo per žiaunas ir inkstus, taip pat tvenkinių tręšimo. Šių junginių kaupimasis gali sukelti rimtų aplinkos problemų: padidėjęs nutekėjimas bei sumažėjusi ištirpusio deguonies koncentracija blogina vandens kokybę (Wu, 1995; Dev, 1998; Tovar et al., 2000; Pérez-Osuna, 2001; Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin, 2007; Pérez et al., 2008). Maistinių medžiagų perteklius skatina pirminių producentų – dumblių – augimą, dėl to savo ruožtu gali pakisti vandens ekosistemų struktūra ir sudėtis (Read & Fernandes, 2003; Biao & Kaijin, 2007).

Tam tikromis fizikinėmis sąlygomis kartu su kitais veiksniais gali vystytis KDŽ. Pavyzdžiui, 1993 ir 1995 m. Geltonosios jūros šiaurinėje dalyje *Chattonella marina* žydėjimas buvo susijęs su krevečių fermų išleidžiamomis nuotekomis (Biao & Kaijin, 2007). Toks fitoplanktono žydėjimas gamina įvairius toksinus (pavyzdžiui, DSP – diarėjinis apsinuodijimas vėžiagyviais, PSP – paralyžinis apsinuodijimas vėžiagyviais, ASD – amneziją sukeliančios medžiagos), kurie žaloja vėžiagyvius, dugno fauną ir kartais laukines arba ūkiuose auginamas žuvis, taip keldami grėsmę akvakultūros ekonomikai (Pearson & Black, 2001; Read & Fernandes, 2003; Gyllenhammar & Hakanson, 2005).

Nors jūros vanduo natūraliai praskiedžia nuotekas, todėl atviroje jūroje eutrofikacijos rizika narvų ūkiams yra maža (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001), lokalūs eutrofikacijos židiniai gali susidaryti vietovėse su ribota vandenų apykaita (pavyzdžiui, pakrančių lagūnose, estuarijose) (Wu, 1995; Pearson & Black, 2001). Tokiomis sąlygomis per didelis maistinių medžiagų kiekis ne tik apsunkina ekosistemos produktyvumą, bet kai kuriais atvejais ir tiesiogiai neigiamai veikia pačią akvakultūros veiklą (Dev, 1998; Pérez-Osuna, 2001).

5.2. Cheminių medžiagų ir antibiotikų naudojimo poveikis

Akvakultūroje taikomi įvairūs chemikalai ir vaistai, siekiant užkirsti kelią ligoms ir gerinti auginamų organizmų produktyvumą. Dažniausiai naudojamos šios cheminių medžiagų grupės: vitaminai, pigmentai, mineralai ir hormonai; dezinfekcinės medžiagos (pavyzdžiui, balikliai, malachitinė žoluma) ir pesticidai (moluskocidai, piscidai); kalkinimo medžiagos; metalai (antifoulantai); veterinariniai vaistai, įskaitant antibiotikus, anestetikus, parazitocidus ir vakcinas (Read & Fernandes, 2003; Costello et al., 2001). Naudojant antibiotikus ir kitus



vaistus, jų likučių dažnai patenka į aplinką, ypač kai netaikomos veiksmingos atliekų tvarkymo priemonės. Tokie likučiai gali paveikti vietines ekosistemas: antibiotikai, patekę į natūralią vandens aplinką, lemia atsparių bakterijų atsiradimą ir plitimą. Šios bakterijos gali perduoti atsparumo genus kitiems mikroorganizmams, įskaitant žmonių ir gyvūnų patogenus (Okocha et al., 2018). Be to, antibiotikai gali trikdyti mikroorganizmų ir dumblių bendrijas, kurios yra svarbios vandens ekosistemų sveikatai (Li et al., 2024). Dėl sudėtingo biologinio skaidymo šie junginiai kaupiasi nuosėdose ir vandenyje, o ilgainiui gali užteršti paviršinius ir požeminius vandenį, lemti didelius mikroorganizmų bendrijų pokyčius bei biologinės įvairovės mažėjimą (Luthman et al., 2024).

Antibiotikų likučiai akvakultūros produktuose kelia riziką žmonių sveikatai, o ilgalaikis antibiotikų naudojimas gali sutrikdyti ir pačių vandens organizmų žarnyno mikroflorą, sumažinti jų atsparumą ligoms ir augimo efektyvumą. Dėl antibiotikų kaupimosi aplinkoje gali išsivystyti atsparūs patogenai, kurie vėliau gali išplisti ir į kitas ekosistemas bei kelti grėsmę tiek vandens, tiek sausumos gyvūnijai (Farias et al., 2024). Kiti biologiniai produktai, tokie kaip organinės medžiagos skaidytojai (bakterijos, fermentų preparatai), taip pat naudojami vandens kokybei gerinti (Gräslund & Bengtsson, 2001). Cheminių medžiagų naudojimo mastas priklauso nuo auginimo intensyvumo ir technologijos: pusiau intensyviuose ūkiuose cheminių priemonių reikia mažiau, o intensyvėjant gamybai didėja ir naudojamų cheminių medžiagų įvairovė bei kiekis (Boyd & Massaut, 1999; Gräslund & Bengtsson, 2001).

Narvų sistemose dažniausiai naudojamos dezinfekcinės priemonės, antifoulantai ir veterinariniai vaistai (Kelly & Elberizon, 2001; Read & Fernandes, 2003). Pagrindiniai pavojai aplinkai, susiję su cheminių medžiagų naudojimu akvakultūroje, yra šie: vandens kokybės blogėjimas; biogeocheminių procesų sutrikimas; tiesioginis toksiškumas vandens organizmams ir augalams; atsparių patogenų išsivystymas; gydomųjų priemonių veiksmingumo sumažėjimas (Costello et al., 2001). Netinkamas cheminių junginių naudojimas gali kelti grėsmę ne tik aplinkai, bet ir akvakultūros produktų saugai bei žmonių sveikatai (Choo, 2001; Islam et al., 2004).

Santrauka

Akvakultūra yra svarbi pasaulinio maisto tiekimo grandinės dalis, tačiau jos spartus augimas kelia vis daugiau aplinkosaugos iššūkių, ypač klimato kaitos laikotarpiu. Ši veikla yra reikšmingas šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD), buveinių nykimo ir gamtos išteklių išsekimo šaltinis. Daug energijos eikvojančios operacijos, pašarų gamyba ir atliekų tvarkymas skatina CO₂, metano ir azoto oksido emisijas. Daugelyje įmonių naudojama elektros energija iš iškastinio kuro, o anaerobinės sąlygos tvenkiniuose didina metano išskyrimą.

Sparčiai plečiantis akvakultūrai, keičiasi žemės naudojimas – nyksta mangrovės ir pelkės, prarandamos svarbios buveinės, mažėja biologinė įvairovė ir anglies sekvestracija, didėja pakrančių erozija. Pašarų gamyba itin veikia aplinką: tradiciškai gaminant žuvų miltus skatinamas jūrų išteklių pereikvojimas, o naudojant augalines alternatyvas – miškų naikinimas

ir žemės degradacija. Nors kuriami nauji baltymų šaltiniai, pavyzdžiui, vabzdžių miltai, jų taikymas dar ribotas.

Kita problema – didelis atliekų kiekis: nesuėsti pašarai, žuvų ekskrementai ir cheminių medžiagų likučiai prisideda prie vandens taršos, eutrofikacijos ir kenksmingų dumblių žydėjimo, kurie mažina deguonies kiekį ir trikdo ekosistemų pusiausvyrą. Taip pat išlieka pavojus dėl antibiotikų naudojimo ir atsparumo jiems plitimo, kas gali turėti poveikį ir žmonių sveikatai.

Norint užtikrinti ilgalaikį akvakultūros tvarumą, būtina pereiti prie atsakingesnių praktikų: naudoti atsinaujinančią energiją, efektyvinti pašarų gamybą, atsakingai tvarkyti žemės išteklius ir taikyti veiksmingus atliekų tvarkymo sprendimus. Tvarios akvakultūros plėtra turi būti derinama su aplinkos apsauga, kad didėjanti jūrų gėrybių paklausa nekenktų gamtai ateityje.

Literatūra

- Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue revolution and the changing land use pattern in aquaculture development. *Aquaculture Reports*, 14, 100219.
- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331–349.
- Alongi, D. M. (2015). The impact of shrimp farming on mangrove ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 56, 1–10.
- Bano, S., Wu, Q., Yu, S., Wang, X., & Zhang, X. (2024). Soil properties drive nitrous oxide accumulation patterns by shaping denitrifying bacteriomes. *Environmental Microbiome*, 19, 94.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.
- Biao, X., & Kaijin, Y. (2007). Shrimp farming in China: Environmental impact and sustainability. *Aquaculture International*, 15(5), 21–39.
- Boyd, C. E., et al. (2020). Environmental assessment and management in aquaculture. *Aquaculture International*, 28(2), 697–716.
- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113–132.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
- Bujas, T., Koričan, M., Vukić, M., Soldo, V., Vladimir, N., & Fan, A. (2022). Review of energy consumption by the fish farming and processing industry in Croatia and the potential for zero-emissions aquaculture. *Energies*, 15(21), 8197.
- Bureau, D. P., & Cho, C. Y. (2006). Feeding strategies and diet formulation to reduce waste outputs in aquaculture. *Aquaculture Research*, 37(3), 123–135.
- Chavez, J., et al. (2020). Effects of aquaculture on habitat fragmentation and ecosystem dynamics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 452–465.
- Choo, P. S. (2001). Mangroves, shrimps and aquaculture in Malaysia. *Aquaculture Asia Magazine*, 6(2), 5–7.
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Diet formulation and feeding systems to reduce environmental impact in aquaculture. *Aquaculture Research*, 29(3), 123–135.
- Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., & Tukker, A. (2019). Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth*, 1(3), 292–297.



- Dalsgaard, T., & Krause-Jensen, D. (2006) Monitoring nutrient release from fish farms with macroalgal and phytoplankton bioassays. *Aquaculture*, 256, 302–310.
- Dev, A. K. (1998) Fake Blue Revolution: Environmental and Socio-Economic Impacts of Shrimp Culture in the Coastal Areas of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 41, 63–88.
- Duarte, T. A., Correia, D. M., & Silva, J. L. (2020). The role of alternative protein sources in sustainable aquaculture: Plant-based proteins. *Aquaculture Research*, 51(4), 1234–1247.
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. FAO.
- Fargione, J., Tilman, D., & Clark, M. (2023). Agricultural expansion and its impact on biodiversity: A global perspective. *Nature Sustainability*, 6(3), 182–190.
- Farias, D. R., Ibarra, R., Estévez, R. A., Tlustý, M. F., Nyberg, O., Troell, M., Avendaño-Herrera, R., & Norden, W. (2024). Towards Sustainable Antibiotic Use in Aquaculture and Antimicrobial Resistance: Participatory Experts' Overview and Recommendations. *Antibiotics*, 13(9), 887.
- Freda, C. G., Smith, M., & Gupta, M. (2022). Insect protein as a sustainable alternative for aquaculture: An environmental review. *Journal of Insect Science*, 22(1), 10–20.
- Gräslund, S., & Bengtsson, B. E. (2001). Chemicals and biological products used in south-east Asian shrimp farming, and their potential impact on the environment – A review. *The Science of the Total Environment*, 280(1–3), 93–131.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Diez, J. M., Damschen, E. I., & Holt, R. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on biodiversity. *Nature Communications*, 6, 7926.
- Harper, G. J., Steininger, M. K., Tucker, C. J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007). Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, 34(4), 325–333.
- Holmer, M., Hansen, P. K., Karakassis, I., Borg, J. A., & Schembri, P. J. (2008). Monitoring of Environmental Impacts of Marine Aquaculture. In M. Holmer, K. Black, C. M. Duarte, N. Marbà, I. Karakassis (eds.), *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, Dordrecht.
- Holmer, M., Duarte, C. M., & Marbà, N. (2007). Sediment biogeochemical changes associated with fish farms in coastal Mediterranean regions. *Environmental Pollution*, 118(2), 313–319.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Islam, M. S., Kabir, M. S., Khan, S. I., Ekramullah, M., Nair, G. B., Sack, R. B., & Sack, D. A. (2004). Wastewater-grown duckweed may be safely used as fish feed. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(1), 51–56.
- Kalantzi, I., & Karakassis, I. (2006). Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, 52(5), 484–493.
- Kautsky, N., Berg, H., Folke, C., Larsson, J., & Troell, M. (2000). Ecological footprint and trophic level impact of aquaculture: Implications for sustainability. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1–12.
- Kelly, L. A., & Elberizon, I. R. (2001). Freshwater finfish cage culture. In K. D. Black (ed.), *Environmental Impacts of Aquaculture* (pp. 1–32). Sheffield Academic Press.
- Li, Z., He, H., Ding, J., Zhang, Z., Leng, Y., Liao, M. & Xiong, W. (2024). Effects of Three Antibiotics on Nitrogen-Cycling Bacteria in Sediment of Aquaculture Water. *Water*, 16(9), 1256.
- Li, H., Liu, H., Zhou, X., Gao, L., Liang, J., Chen, L., Guo, Y., & Liang, S. (2024). Carbon footprint assessment and reduction strategies for aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), n/a.
- Luthman, O., Robb, D. H., F., Jørgensen, P. S., & Troell, M. (2024). Global overview of national regulations for antibiotic use in aquaculture production. *Aquaculture International*, 32, 9253–9270.



MacLeod, M., Hasan, M. R., Robb, D. H. F. & Mamun-Ur-Rashid, M. (2019). Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626*. Rome, FAO.

Magrin, G. O., Rojas, S. M., & Tschakert, P. (2020). Soybean monocultures and their environmental impact: A case study of the expansion in South America. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074010.

Matulić, D., Tomljanović, T., & Piria, M. (2020). Feeding systems in aquaculture: Efficiency and environmental impact. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 11(3), 123–135.

Marrone, A., Mangano, M. C., Deidun, A., Berlino, M., & Sarà, G. (2023). Effects of habitat fragmentation of a Mediterranean marine reef on the associated fish community: Insights from biological traits analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1957.

Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405(6790), 1017–1024.

Nash, C. E. (2005). *The history of aquaculture*. Blackwell Publishing.

Nordvang, L., & Håkanson, L. (2002). Predicting the environmental impacts of fish farms using flow models. *Aquaculture International*, 10(5), 359–379.

O'Flynn, N., FitzGerald, R. J., & Hayes, M. (2021). Plant-based proteins as alternatives to fishmeal in aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 27(3), 123–135.

Okocha, R. C., Olatoye, I. O. & Adediji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public Health Rev*, 39, 21.

Páez-Osuna, F. (2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environmental Management*, 28(1), 131–140.

Paez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaronicultura en' la zona costera. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1, 21–31.

Pardoe, J. R., Leach, D. H., & Minchinton, T. E. (2022). Environmental challenges of plant-based feed ingredients in aquaculture: Implications for water and nutrient management. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111–121.

Parker, R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8(4), 333–337.

Pearson, T. H., & Black, K. D. (2001). *Environmental impacts of aquaculture*. Sheffield Academic Press.

Pérez, M., Romero, J., & Duarte, C. M. (2008). *Nutrient dynamics in seagrass ecosystems*. Springer.

Pu, Y., Zhang, Mi., Jia, L., Zhang, Z., Xiao, W., Liu, Shoudong., Zhao, J., Xie, Y & Lee, X. (2022). Methane emission of lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, 107883.

Rahman, M., et al. (2022). Land use transformation and environmental consequences of aquaculture expansion in Sundarbans. *Environmental Sustainability*, 25(1), 87–104.

Read, P., & Fernandes, T. (2003). Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. *Aquaculture*, 226(1–4), 139–163.

Ruiz, J. M., Pérez, M., & Romero, J. (2001). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: Seagrass decline after organic loading cessation. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), 38–41.

Serpa, D., Duarte, P. (2008). Impacts of Aquaculture and Mitigation Measures. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, 2, Special Issue 1, 1–20.

Soussana, J. F., Lemaire, G., & Van de Kuilen, S. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture: Global impact of feed production. *Agricultural Systems*, 181, 102808.

Sulistijowati, R., Yuliati, L., Komariyah, S. & Musaiyaro, A., (2023). Analysis of Trade, Investment, and Global Value Chain on the Gross Domestic Product of Fisheries Sector in Indonesia. *International Journal of professional business review*, 8(6).

Sun, Z., Wang, L., Tian, H., Jiang, H., Mou, X., & Sun, W. (2013). Fluxes of nitrous oxide and methane in different coastal Suaeda salsa marshes of the Yellow River estuary, China. *Chemosphere*, 90, 856–865.



- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2009). Aquaculture feed and the environment: A global perspective. *Aquaculture*, 292(1–2), 1–13.
- Talbot, C., Corneillie, S., & Korsøen, O. (1999). Optimal feeding strategies for cage farming of salmonids. *Aquaculture International*, 7(2), 123–135.
- Tidwell, J. H., & Allan, G. L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. Ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries. *EMBO Reports*, 2(11), 958–963.
- Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767–784.
- Thorpe, J. E., & Cho, C. Y. (1995). Nutritional requirements and feeding strategies for salmonids. *Aquaculture Nutrition*, 1(1), 77–87.
- Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M. P., & Garcia-Vargas, M. (2000). Environmental impacts of intensive aquaculture: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7–12), 550–563.
- United Nations Environment Programme. (2022). *How do greenhouse gases actually warm the planet?* <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-do-greenhouse-gases-actually-warm-planet>
- Walters, B. B., Ronnback, P. J., Kovacs, J. M., Bradley B., Crona, B., Hussain, S. A., Badola, R., Primavera, J. H., Barbier, E., & Dahdouh-Guebas, F. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 220–236.
- White, P. (2013). Environmental consequences of poor feed quality and feed management. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. On-farm feeding and feed management in aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583*. Rome, FAO, 553–564.
- Wróbel, J., Gałczyńska, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., & Formicki, K. (2023). The challenges of aquaculture in protecting the aquatic ecosystems in the context of climate changes. *Journal of Water and Land Development*, 57, 231–241.
- Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166.